

В. В. ОВЧИННИКОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ СВАРКИ

Рекомендовано

*Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования»
в качестве учебного пособия для использования
в учебном процессе образовательных учреждений,
реализующих программы начального профессионального
образования*

*Регистрационный номер рецензии 186
от 28 апреля 2009 г. ФГУ «ФИРО»*

5-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2016

УДК 621.791(075.32)
ББК 30.61я722
О-355

Рецензенты:

преподаватель высшей категории ГОУ СПО «Строительный колледж № 26»,
г. Москва *Л. М. Карлукхина*;
преподаватель высшей категории ГОУ СПО МО
«Республиканский политехнический колледж» *Г. Н. Сидоренко*

Овчинников В. В.

О-355 Современные виды сварки : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В. В. Овчинников. — 5-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2016. — 208 с.

ISBN 978-5-4468-4151-6

Рассмотрены физические и технические основы, области применения и перспективы использования традиционных и специальных методов сварки в твердой фазе и сварки плавлением. Приведены основные технологические параметры и режимы сварки для ряда конструкционных материалов. Даны технологические схемы изготовления типовых сварных конструкций.

Учебное пособие может быть использовано при освоении профессионального модуля ПМ.02 «Сварка и резка деталей из различных сталей, цветных металлов и их сплавов, чугунов во всех пространственных положениях» (МДК.02) по профессии «Сварщик».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.791(075.32)
ББК 30.61я722

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-4468-4151-6

© Овчинников В. В., 2011
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

Сварка — один из ведущих технологических процессов современной промышленности. До двух третей стального проката в мире идет на производство сварных конструкций. В настоящее время достигнуты значительные успехи в разработке прогрессивных методов сварки, создании высокоэкономичных сварных конструкций, освоении сварки многих специальных сталей, цветных металлов и их сплавов и других материалов.

подавляющая часть объема сварочных работ приходится на традиционные способы сварки (плавлением): электродугую (70 ... 80 % от общего объема работ), контактную и газовую.

Традиционные способы сварки, сопровождающиеся расплавлением соединяемых заготовок, не всегда позволяют сваривать конструкции из новых высокопрочных, коррозионно-стойких, магнитных и других специальных материалов в машиностроительной, электротехнической, электронной и других отраслях промышленности. Это объясняется тем, что расплавление металла, развитие рекристаллизационных процессов и фазовые превращения, обусловленные термическим циклом сварки, приводят к необратимым изменениям структуры и потере свойств таких материалов.

Значительные трудности, возникающие при соединении разнородных материалов с помощью сварки плавлением, связаны с невозможностью ограничения процессов взаимной диффузии, приводящих к развитию химической неоднородности, появлению хрупких интерметаллидных фаз.

Созданные в последние годы жаропрочные материалы (литейные, никелевые, дисперсно-упрочненные, композиционные) практически не поддаются сварке плавлением.

Традиционные методы сварки не позволяют создавать крупногабаритные тонкостенные многослойные конструкции, необходимые для уменьшения массы летательных аппаратов, охлаждения или обогрева их узлов, снижения шума и т. д.

Наряду с традиционными способами сварки успешно используются и развиваются специальные способы. Название это в значительной мере условно и связано главным образом с относительно

редким их применением, а в ряде случаев — с высокой стоимостью оборудования и технической сложностью реализации. Несмотря на относительно небольшой объем применения, значение специальных способов сварки в развитии самых разных отраслей промышленности (аэрокосмической, машиностроения, радиоэлектроники, металлургии) трудно переоценить.

Современное состояние техники характеризуется возросшим спросом на редкие металлы, сплавы и неметаллические материалы. В перспективных конструкциях находят широкое применение металлы, обладающие высокими жаростойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и некоторыми особыми свойствами. Дальнейшее развитие авиационной и космической техники связано с созданием прецизионных тонкостенных слоистых конструкций с элементами большой протяженности и малой толщины, с высокой удельной прочностью.

Совершенствование традиционных способов сварки не всегда обеспечивает получение конструкций с требуемыми свойствами, а иногда они непригодны либо неэффективны. В таких случаях рациональнее использовать специальные методы сварки. Например, при получении биметаллов соединение металлических листов по всей площади выполняется с помощью сварки прокаткой; соединение миниатюрных деталей в электронной промышленности целесообразно выполнять лазерной или ультразвуковой сваркой; при соединении ответственных силовых деталей из высокопрочных сплавов при жестком ограничении остаточных деформаций, как правило, выбирают электронно-лучевую сварку.

Создание экономичных, надежных и долговечных сварных конструкций из новых конструкционных материалов, работающих в широком диапазоне температур в агрессивных средах, представляет собой важную научно-техническую задачу ближайшего будущего. Решение этой задачи неразрывно связано с развитием и совершенствованием традиционных и созданием и внедрением специальных способов сварки.

ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

1.1. ГАЗОПЛАМЕННАЯ СВАРКА

Особенности способа. Газопламенная сварка относится к группе способов сварки плавлением. Существенное отличие газопламенной сварки — плавный и медленный нагрев металла — в одних случаях является недостатком способа, в других — достоинством. Это отличие и определяет основные области его применения: сварка сталей малой толщины (0,2...5 мм), цветных металлов, чугуна, специальных и инструментальных сталей, выполнение наплавочных работ.

Благодаря универсальности, сравнительной простоте и портативности необходимого оборудования газопламенная сварка весьма целесообразна при выполнении многих видов ремонтных работ. В то же время сравнительно медленный нагрев металла газовым пламенем заметно снижает производительность сварки с увеличением толщины металла, а при толщине свыше 8...10 мм газовая сварка обычно экономически невыгодна. При замедленном нагреве разогревается большой объем основного металла, прилегающего к сварочной ванне, что вызывает коробление свариваемых деталей.

Образование сварочного пламени. Горение — это реакция соединения твердого, жидкого или газообразного горючего вещества с кислородом или воздухом. Для газовой сварки наибольшее значение имеет процесс горения горючих газов. Процесс горения горючего газа начинается с его воспламенения при определенной температуре, зависящей от условий, в которых протекает процесс горения. Дальнейший нагрев газа от внешнего источника не нужен, если выделяемой при горении теплоты достаточно для поддержания горения новых порций горючей смеси и компенсации потерь теплоты в окружающую среду.

В зависимости от протекания процесса сгорания ацетилена сварочное ацетиленокислородное пламя имеет определенную форму (рис. 1.1).

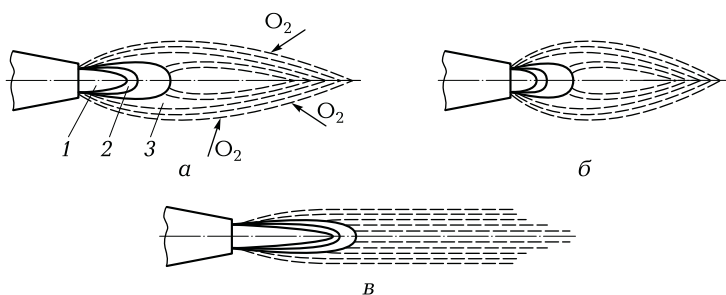
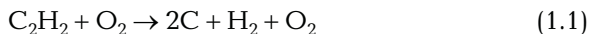


Рис. 1.1. Форма и строение нормального (а), окислительного с избытком кислорода (б) и науглероживающего с избытком ацетилена (в) сварочного пламени:

1 — ядро; 2 — средняя зона; 3 — факел (внешняя зона)

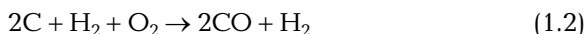
Во внутренней части ядра пламени происходит постепенный подогрев газовой смеси, поступающей из мундштука, до температуры воспламенения. В ядре пламени происходит термическое разложение ацетилена по реакции



Разложение ацетилена ускоряется за счет присутствия в ядре кислорода, подаваемого в горелку.

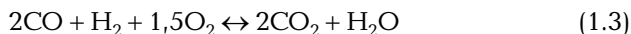
Образующийся углерод представляет собой мельчайшие твердые частицы, окружающие тонким раскаленным слоем ядро пламени, вызывая его свечение. Оболочка ядра с температурой примерно 1500 °С является самой яркой частью сварочного пламени. По внешнему виду ядра визуально определяют состав пламени и исправность сварочной горелки.

В средней зоне пламени благодаря присутствию в смеси кислорода происходит неполное окисление углерода по реакции



Выделяющаяся при этом теплота способствует подогреву смеси и ускорению протекающих в ней окислительных процессов. Как видно из рис. 1.2, средняя зона пламени характеризуется максимальной температурой.

В факеле (внешней зоне) пламени при взаимодействии оксида углерода и водорода с кислородом, поступающим из воздуха, происходит их догорание по реакции



При этом выделяется большое количество теплоты. Однако из-за большого объема зоны факела температура в ней ниже, чем в средней зоне.

Для образования *нормального пламени* (см. рис. 1.1, а) и полного сгорания ацетилена необходимо на каждый его объем подводить в горелку такой же объем кислорода, т. е. отношение $\beta = V_{\text{к}}/V_{\text{а}} = 1,1 \dots 1,3$. При $\beta > 1,3$ образуется *окислительное пламя*, которое содержит избыточный кислород, окисляющий металл. В этом случае ядро пламени укорачивается, становится заостренным, с менее резкими очертаниями (см. рис. 1.1, б), бледнеет и приобретает синеватую окраску.

При уменьшении количества поступающего кислорода (при избытке ацетилена) образуется *науглероживающее пламя* (см. рис. 1.1, в). Объем средней зоны при этом увеличивается, ядро становится расплывчатым, и за ним появляется «ацетиленовое перо» зеленоватого цвета. При значительном избытке ацетилена частицы углерода появляются и в наружной зоне, пламя начинает коптить, удлиняется и приобретает красноватую окраску.

Строение пламени газов — заменителей ацетилена, в состав которых входят углеводороды, существенно не отличается от строения ацетиленокислородного пламени, но имеет менее четко выраженное светящееся ядро, что затрудняет регулирование состава пламени по внешнему виду.

Образование сварного соединения. При нагреве пламенем горелки происходит местное расплавление металла соединяемых деталей. Расплавленный металл кромок вместе с металлом присадки образует сварочную ванну, которая находится в границах, определяемых твердым металлом. Расплавленный металл смачивает кромки деталей, удаляет покрывающую их пленку и создает возможность проявления сил межатомного взаимодействия.

В процессе сварки газовое пламя перемещается вдоль кромок соединяемых деталей. Вместе с ним перемещается и сварочная ванна. В результате последовательного охлаждения и затверде-

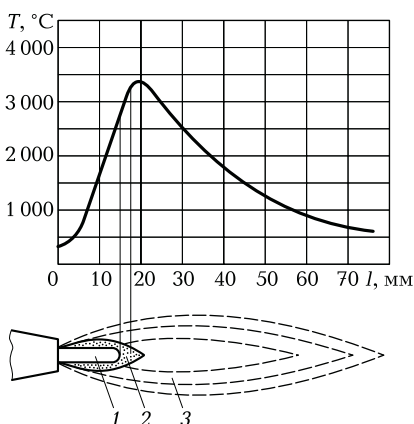


Рис. 1.2. Распределение температуры T по оси ацетиленокислородного пламени:

1 — ядро; 2 — средняя зона; 3 — факел (внешняя зона); l — длина пламени

вания металла сварочной ванны образуется сварное соединение.

Объем сварочной ванны мал по сравнению с объемом соединяемых деталей, поэтому происходит интенсивный отвод теплоты. Для поддержания металла сварочной ванны в жидком состоянии и нормального протекания процесса сварки необходимы высокая температура и большая тепловая мощность источника нагрева.

Используемые материалы. При газопламенной сварке применяются кислород, горючие газы, присадочная проволока и флюсы.

Кислород — самый распространенный элемент — в газообразном состоянии прозрачен, не имеет цвета, запаха и вкуса, не способен гореть, но активно поддерживает процесс горения.

Горючие газы и пары образуют с кислородом взрывчатые смеси, обладающие широкими пределами взрываемости при воспламенении. Распространение взрывной волны в таких смесях протекает со скоростью 3 000 м/с и выше.

Основной способ промышленного получения кислорода во всем мире — извлечение из атмосферного воздуха методом его глубокого охлаждения и ректификации воздуха.

Для газовой сварки и резки применяются различные горючие газы, при сгорании которых в смеси с техническим кислородом температура газового пламени превышает 2 000 °С. По химическому составу они (за исключением водорода) представляют собой углеводородные соединения или смеси различных углеводородов.

Чаще всего для газопламенной сварки применяется ацетилен, при сгорании которого в кислороде образуется пламя с более высокой температурой, чем при сгорании других горючих газов.

Ацетилен представляет собой углеводород ненасыщенного ряда. Его химическая формула C_2H_2 , структурная формула $H-C \equiv C-H$. При атмосферном давлении и нормальной температуре ацетилен — бесцветный газ. Технический ацетилен вследствие присутствия в нем примесей имеет резкий специфический запах.

При температуре 20 °С и давлении 0,1 МПа плотность ацетилена $\rho = 1,09 \text{ кг/м}^3$. При атмосферном давлении 1 атм и температуре $-82,4 \dots -83,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ацетилен сжижается, а при температуре $-85 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже переходит в твердое состояние, образуя кристаллы. Жидкий и твердый ацетилен легко взрывается от трения, механического или гидравлического удара и действия детонатора.

Основным способом получения ацетилена является переработка карбида кальция — довольно громоздкий, дорогой и энергозатратный способ. В последние годы разработаны и быстро внедряются в промышленность более экономичные и высокопроизводитель-

ные способы получения ацетилен: из природного газа пиролизом метана в смеси с кислородом и разложением жидких горючих веществ (нефти, керосина) действием дугового разряда. Получение ацетилен из природного газа на 30...40 % дешевле по сравнению с получением его из карбида кальция. Пиролизный ацетилен, используемый для сварки и резки, по свойствам не отличается от ацетилена, получаемого из карбида кальция.

Для хранения и транспортирования ацетилен под давлением используются баллоны, заполненные специальной пористой массой, пропитанной ацетоном. Ацетон, являясь хорошим растворителем для ацетилен, позволяет существенно увеличить объем ацетилена, накачиваемого в баллон, и снижает его взрывоопасность.

Иногда ацетилен заменяется другими горючими газами.

Газы-заменители целесообразно использовать в тех случаях, когда не требуется слишком высокая температура подогревающего пламени: при сварке легкоплавких металлов (алюминия, магния и их сплавов, свинца), пайке высокотемпературными и низкотемпературными припоями, поверхностной закалке, сварке тонкой стали, кислородной разделительной и поверхностной резке.

Коэффициент ψ замены ацетилен — это отношение расхода газа-заменителя V_3 к расходу ацетилен V_a при равном тепловом воздействии на нагреваемый металл: $\psi = V_3/V_a$. Принимаемые на практике значения коэффициентов ψ замены ацетилен другими горючими газами приведены в табл. 1.1.

Водород в нормальных условиях — один из самых легких газов (в 14,5 раза легче воздуха), не имеет цвета и запаха. Водород опасен тем, что в смеси с кислородом и воздухом образует гремучий газ — взрывчатую смесь большой силы.

Метан — газ без цвета и запаха, взрывоопасный при концентрации его в воздухе 5...15% — является главной составляющей большинства природных горючих газов и в больших объемах выделяется при добыче и переработке нефти и каменного угля.

Таблица 1.1. Значения коэффициентов замены ацетилен другими горючими газами

Резка стали	Водород	Метан	Технический пропан	Коксовый газ	Сланцевый газ	Нефтяной газ
Разделительная	5,2	1,6...1,8	0,6	3,2...4,0	4,0	1,2
Поверхностная	—	4,0	1,0...1,2	5,0	6,0...8,0	1,8...2,4

Пропан — бесцветный газ с резким запахом, получаемый при переработке нефтепродуктов. Таким же способом получают и бутан — газ без цвета и запаха, сжижающийся при температуре 0 °С, взрывоопасный при концентрации его в воздухе 1,5...8,5 %. Для сварки чаще применяется технический пропан (смесь пропана с бутаном), который получают как побочный продукт переработки нефти. Пропан, бутан или их смесь подаются к месту сварки в стальных баллонах, в жидком состоянии под давлением 1,6 МПа.

Коксовый газ получают в процессе коксования каменного угля. Средний состав коксового газа: 50...59 % H₂; 25...30 % CH₄; 1,8...3,0 % C₂H₄ и других непредельных углеводородов; 5...7 % CO; 6...13 % N₂ и CO₂; 0,5...0,8 % O₂.

Сланцевый газ получают при газификации горючих сланцев.

Температура пламени коксового и сланцевого газов в смеси с кислородом составляет 2000 °С.

Коксовый и сланцевый газы подаются к постам газопламенной сварки по трубопроводу и используются при сварке легкоплавких металлов, пайке, разделительной и поверхностной кислородной и кислородно-флюсовой резке.

Нефтяной газ — это смесь газообразных продуктов термического разложения в ретортах при температуре 720...740 °С нефти, нефтепродуктов и мазута. Выход газа — 0,35...0,4 м³ на 1 кг нефти. Состав зависит от состава нефти и режима ее переработки. При закачивании в баллоны газ находится в полусжиженном состоянии. При отборе газа его состав изменяется вследствие испарения в первую очередь летучих компонентов. Температура пламени этих газов составляет 2297 °С.

Жидкое горючее (бензин и керосин) также иногда используют вместо ацетилена. Оно доступнее, дешевле и безопаснее горючих газов. Жидкое горючее превращается в пар непосредственно в сварочных горелках при подогреве специальным пламенем, что усложняет конструкцию горелок. Для сварки предпочтительнее использовать бензин с низким октановым числом, например А-66. Керосин применяется осветительный, предварительно профильтрованный через войлок и кусочки едкого натра (NaOH) для очистки от механических частиц, смолистых веществ и воды.

Присаговая проволока для газопламенной сварки сталей применяется такая же, как и при всех видах дуговой сварки (согласно ГОСТ 2246—70): 6 марок низкоуглеродистой, 30 марок легированной, 41 марка высоколегированной стальной холоднотянутой проволоки диаметром 0,3...12 мм. Проволока поставляется в мотках массой не более 80 кг с обязательной маркировкой. Маркировка

стальной проволоки должна содержать цифровое обозначение ее диаметра, цифровое обозначение содержания углерода (в сотых долях процента), буквы «Св» (сварочная), буквенные обозначения легирующих элементов (такие же, как при маркировке сталей: «Б» — ниобий, «В» — вольфрам, «Г» — марганец, «Д» — медь, «Н» — никель, «С» — кремний, «Ф» — ванадий, «Х» — хром, «Ц» — цирконий, «Ю» — алюминий) и цифровое обозначение их процентного содержания (отсутствие цифр означает, что данного элемента менее 1 %). Буква «А» в конце маркировки указывает на повышенную чистоту металла проволоки по содержанию серы и фосфора, «АА» — на более высокую степень очистки; «О» после этих букв означает, что проволока омедненная.

Для сварки чугуна применяются чугунные прутки, которые маркируются в соответствии с назначением: «А» — для газовой сварки с общим подогревом изделия (горячая сварка), «Б» — для газовой сварки с местным подогревом, «Н4-1» и «Н4-2» — для низкотемпературной газовой сварки толстостенных отливок, «Б4» и «Х4» — для износостойкой наплавки.

Для сварки алюминия, меди и латуни применяются проволоки или нарубленные из листа полоски, соответствующие по составу свариваемому материалу. При сварке латуни лучше применять специальные присадочные проволоки с добавками кремния и олова, которые препятствуют испарению цинка и увеличивают проплавляющую способность газового пламени, разжижая сварочную ванну. При сварке медных сплавов введение в сварочную проволоку бора делает ее самофлюсующейся. Образующийся борный ангидрид (B_2O_3) связывает оксиды меди и цинка (CuO и ZnO) в борнокислые соли, переходящие в шлак, что позволяет сваривать без флюсов.

Любой присадочный материал для газопламенной сварки должен отвечать общим требованиям: температура плавления не выше температуры плавления основного металла; ровная чистая поверхность (без окалины, ржавчины и других загрязнений); способность плавиться спокойно, без разбрызгивания и обеспечивать химический состав и механические свойства металла шва, близкие к составу и свойствам основного металла; минимальное содержание вредных примесей.

Флюсы применяются при газопламенной сварке для разрушения оксидов на поверхности свариваемого металла, для его защиты от окисления и удаления из металла сварочной ванны оксидов и других химических веществ, отрицательно влияющих на свойства сварного шва. Флюсы применяются в виде порошков или паст,

подаваемых на свариваемые кромки в процессе сварки или нанесенных заранее.

К сварочным флюсам предъявляется ряд технологических и металлургических требований: плотность меньше плотности основного и присадочного металла, чтобы шлак всплывал на поверхность сварочной ванны, а не оставался в металле шва; легкоплавкость выше легкоплавкости основного и присадочного металла; способность хорошо растекаться по нагретой поверхности металла и высокая жидкотекучесть; высокая реакционная способность и возможность активно раскислять оксиды, переводить их в легкоплавкие соединения или растворять так, чтобы процесс удаления оксидов из металла заканчивался до затвердевания сварочной ванны; способность образующегося во время сварки шлака хорошо защищать металл от окисления и от взаимодействия с газами окружающей атмосферы, а также хорошо отделяться от металла после остывания. Кроме того, флюс не должен выделять в процессе сварки ядовитые газы и способствовать коррозии сварного соединения. Свойства флюса не должны меняться под влиянием высокой температуры газового пламени. Флюс должен быть недорогим и недефицитным.

Технология сварки. Ручная газопламенная сварка выполняется двумя способами: правым и левым (рис. 1.3).

Сварка левым способом ведется справа налево, сварочное пламя направляется на еще не сваренные кромки деталей, присадочная проволока перемещается спереди пламени. Этот способ применяется при сварке тонких и легкоплавких металлов. Кромки деталей перед расплавлением подогреваются: так их легче оплавлять, сварщик хорошо видит свариваемый стык и ванну, внешний вид шва получается лучше.

Сварка правым способом ведется слева направо, пламя направляется на уже сваренный шов, присадочная проволока перемещается

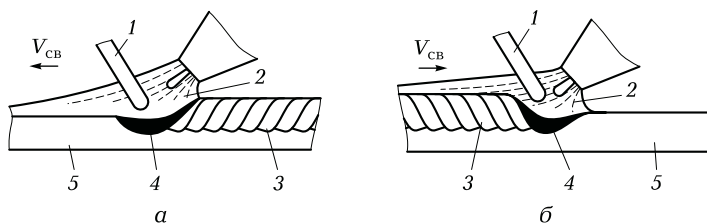


Рис. 1.3. Схема газопламенной сварки левым [а] и правым [б] способами: 1 — присадочная проволока; 2 — газовое пламя; 3 — сварной шов; 4 — сварочная ванна; 5 — свариваемый стык; $V_{св}$ — направление сварки

ется вслед за горелкой. Этот способ обеспечивает лучшую защиту сварочной ванны от воздействия кислорода и азота воздуха (так как хвостовая часть ванны и кристаллизующийся металл закрыты восстановительной зоной пламени), замедленное охлаждение металла в процессе кристаллизации, меньше, чем при левом способе, рассеяние теплоты пламени. В результате повышается качество сварного шва.

Угол разделки толстых кромок может быть не 90, а 60...70°. За счет этого уменьшается количество наплавляемого металла и коробление деталей, а также на 20...25% увеличивается производительность сварки. Расход газов при правом способе на 15...20% меньше, чем при левом.

Правый способ применяется при сварке деталей с кромками толщиной более 5 мм и при сварке металлов с большой теплопроводностью. При сварке деталей с кромками толщиной менее 3 мм производительнее левый способ.

Для сварки деталей толщиной более 5 мм правым способом применяется специальный прием — *сварка пламенем повышенной мощности*. При этом выбирается наконечник горелки с удвоенной мощностью по сравнению с обычной и устанавливается науглероживающее пламя с избытком ацетилена 7...10%. Кромки нагреваются до температуры плавления, при этом их верхний слой обогащается углеродом, что понижает температуру его плавления до 1200 °С. Как только кромки начнут оплавляться («потеть»), в зону стыка вводится нагретая до температуры плавления присадочная проволока. Жидкий присадочный металл растворяет науглероженный верхний слой кромок и образует сварное соединение. Кромки оплавляются на небольшую глубину во избежание образования хрупкого науглероженного слоя металла. Описанный прием обеспечивает высокую производительность сварки, но требует высокой квалификации сварщика.

Для формирования шва при любом способе газопламенной сварки большое значение имеют траектории движения мундштука горелки и конца присадочной проволоки (рис. 1.4). Эти траектории могут быть поперечными зигзагообразными или спиралеобразными, конец проволоки и мундштук могут двигаться одинаково или по-разному. Но во всех случаях характер этих движений должен обеспечить равномерное оплавление свариваемых кромок и перемешивание металла ванны. Выбор характера движения конца проволоки и мундштука горелки определяет характер формирования шва.

К параметрам режима газопламенной сварки относятся мощность пламени, его состав, диаметр присадочной проволоки, ее рас-

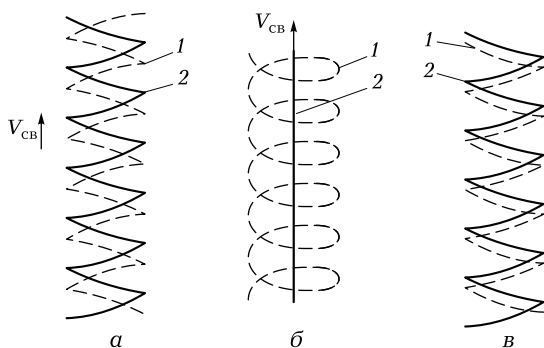


Рис. 1.4. Траектории движения мундштука горелки и конца присадочной проволоки при сварке:

а — зигзагообразные при левом способе сварки; *б* — спиральное движение проволоки и прямолинейное — горелки при правом способе сварки; *в* — зигзагообразные при разделке кромок толщиной более 8 мм при правом способе сварки; 1 — траектория движения конца присадочной проволоки; 2 — траектория движения мундштука горелки; V_{CB} — направление сварки

ход. Выбор режима сварки зависит от теплофизических свойств металла, размеров и формы свариваемой детали, способа сварки и положения сварного шва в пространстве.

Мощность M пламени, л/ч, пропорциональна толщине s , мм, свариваемой кромки:

$$M = k_{\pi} s, \quad (1.4)$$

где k_{π} — коэффициент пропорциональности — удельный расход ацетилена, необходимый для сварки данного металла толщиной 1 мм. Коэффициент k_{π} установлен опытным путем: для углеродистой стали, чугуна и латуни — 100... 130 л/(ч·мм), для легированной стали и алюминиевых сплавов — 75 л/(ч·мм), для меди — 150... 200 л/(ч·мм).

От мощности пламени зависит выбор наконечника горелки.

Состав пламени определяется отношением расхода кислорода к расходу горючего газа и устанавливается визуально — по внешнему виду пламени.

Диаметр d присадочной проволоки для сварки сталей определяется в зависимости от толщины s свариваемых кромок: для левого способа сварки $d = (s+1)/2$, для правого — $d = s/2$. Масса m присадочного металла, необходимая для сварки одного погонного метра шва, пропорциональна квадрату толщины кромок:

$$m = k_{\pi} s^2. \quad (1.5)$$

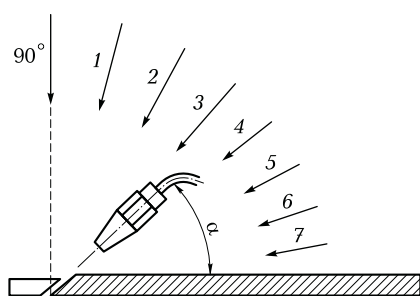
Коэффициент $k_{\text{п}}$ при сварке кромок толщиной до 5 мм принимается: для сталей 12, для меди 18, для латуни 16, для алюминия 6,5. Если толщина кромок больше 5 мм, то эти значения $k_{\text{п}}$ уменьшаются на 20... 25 %.

Вытекающая из мундштука горелки газовая смесь оказывает механическое давление на сварочную ванну и влияет на форму шва, оттесняя металл к краям ванны и отбрасывая его в хвостовую часть. При большой мощности пламени скорость истечения газа из мундштука высокая, пламя становится «жестким». Слишком «жесткое» пламя может привести к выдуванию металла из ванны, ослаблению шва и образованию подрезов. Слишком «мягкое» пламя может привести к обратным ударам.

Кроме скорости истечения газа давление пламени на ванну зависит от угла α наклона мундштука горелки к поверхности свариваемых кромок. Этот угол выбирается в зависимости от толщины свариваемой детали (рис. 1.5). Чем больше угол α , тем больше давление и тем быстрее прогреваются кромки. Поэтому сварку тонких листов нужно производить с малым углом наклона горелки, толстых — с большим. Наклон присадочной проволоки обычно составляет 30... 40° к поверхности детали.

При сварке нельзя выносить конец проволоки из пламени — это увеличит окисление металла. Пламя горелки нужно направлять на стык деталей так, чтобы свариваемые кромки находились в восстановительной зоне пламени. Ядро пламени не должно касаться металла — это вызовет науглероживание шва и может привести к обратным ударам.

Собранные детали с предварительно зачищенными кромками соединяются короткими швами — прихватками, чтобы зафиксиро-



№ позиции	Толщина s свариваемых листов, мм	Угол α , ...°
1	15 и более	80
2	10... 15	70
3	7... 10	60
4	5... 7	50
5	3... 5	40
6	1... 3	30
7	1 и менее	20

Рис. 1.5. Выбор угла α наклона мундштука горелки в зависимости от толщины s свариваемых листов

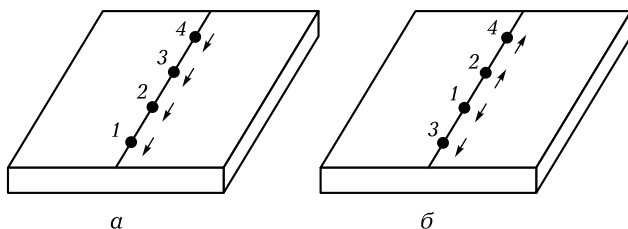


Рис. 1.6. Последовательность [1—4] сварки участков длинных прямолинейных швов при обратноступенчатой сварке от кромки [а], при ступенчатой сварке от середины листа [б]

вать детали в заданном положении и обеспечить постоянный и равномерный зазор между ними. В зависимости от толщины соединяемых кромок прихватки могут иметь длину 5...30 мм, шаг прихваток может быть 50...500 мм. Они выполняются на тех же режимах, что и сварка. Во время сварки во избежание непроваров нужно тщательно разваривать прихваточные швы.

При выполнении длинных прямолинейных швов в любом пространственном положении для уменьшения деформаций применяется ступенчатая и обратноступенчатая сварка. Для этого стык деталей разбивается на участки, которые свариваются в заданной последовательности (рис. 1.6). При сварке очередного участка предыдущий перекрывается на 10...20 мм.

Нижние швы выполняются без затруднений любым способом, поскольку хорошее качество шва обеспечивается за счет силы тяжести. Вертикальные швы при малой толщине листов выполняют-

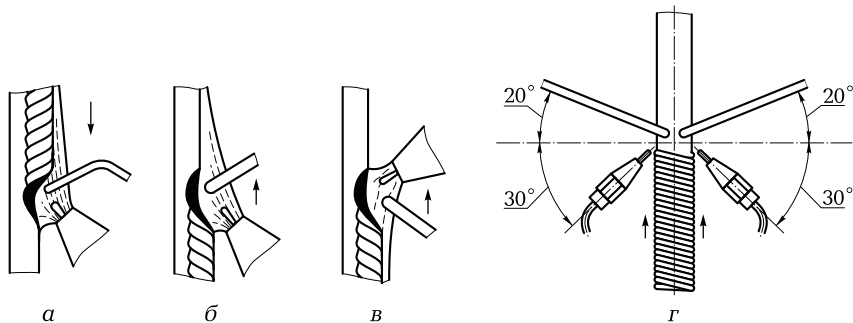


Рис. 1.7. Выполнение вертикальных швов сварки тонких листов: а — сверху вниз правым способом; б, в — снизу вверх правым и левым способом; г — двойным валиком по зазору (снизу вверх правым способом)

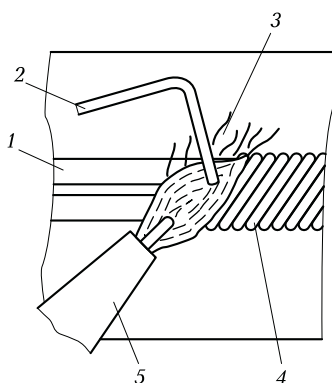


Рис. 1.8. Выполнение горизонтальных швов правым способом:

1 — свариваемый стык; 2 — присадочная проволока; 3 — газовое пламя; 4 — сварной шов; 5 — мундштук горелки

ся сверху вниз правым и снизу вверх левым способом (рис. 1.7). При сварке листов толщиной до 20 мм вертикальные швы можно выполнять двойным валиком по зазору, равному половине толщины листа без разделки кромок. Сварка ведется снизу вверх двумя сварщиками.

Горизонтальные швы выполняются правым способом (рис. 1.8). Мундштук горелки располагается внизу, а присадка — сверху ванны, которая формируется под углом к оси шва. Это помогает удерживать металл ванны от стекания.

Труднее сваривать потолочные швы (рис. 1.9). В этом случае до начала оплавления необходимо нагреть кромки деталей и в этот момент ввести в образующуюся ванну присадочную проволоку. Ее конец быстро оплавляется. Металл удерживается в ванне дав-

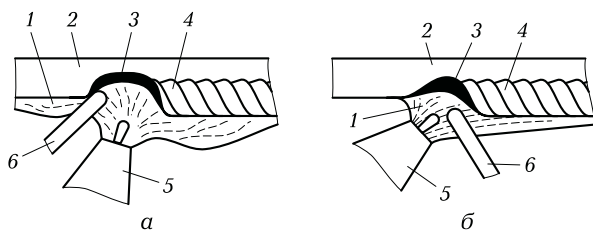


Рис. 1.9. Выполнение потолочных швов левым (а) и правым (б) способами:

1 — газовое пламя; 2 — свариваемый стык; 3 — сварочная ванна; 4 — сварной шов; 5 — мундштук горелки; 6 — присадочная проволока

лением газов пламени. Многослойная сварка деталей толщиной более 5 мм при любом пространственном положении стыка дает меньшую зону нагрева, обеспечивает отжиг нижележащих слоев. Многослойный шов лучше выполнять короткими участками, потому что стыки валиков в разных слоях не должны совпадать. Каждый предыдущий слой перед сваркой последующего нужно зачищать.

1.2. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Особенности способа. Покрытыми электродами свариваются конструкции из черных и цветных металлов и различных сплавов. Рациональная область применения дуговой сварки покрытыми электродами — изготовление металлических конструкций элементов толщиной более 2 мм при небольшой протяженности швов, расположенных в труднодоступных местах и в различных пространственных положениях.

Основные достоинства данного способа сварки — универсальность и простота оборудования, а его недостаток — невысокая производительность, обусловленная малыми допустимыми значениями плотности тока и тем, что

формирование шва происходит в основном за счет электродного металла.

Схема ручной дуговой сварки покрытым электродом показана на рис. 1.10. Возбуждение дуги происходит при кратковременном замыкании электрической сварочной цепи касанием свариваемого металла концом электрода. В процессе сварки по мере плавления электрода он подводится к изделию с одновременным перемещением вдоль соединения и поперек стыка для получения шва необходимой формы и сечения.

При сварке покрытым электродом происходит плавление

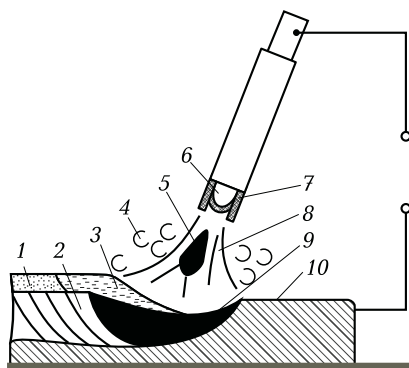


Рис. 1.10. Схема ручной дуговой сварки покрытым электродом:

1 — шлаковая корка; 2 — сварной шов; 3 — жидкая шлаковая пленка; 4 — газовая защита; 5 — капля электродного металла; 6 — электрод; 7 — электродное покрытие; 8 — сварочная дуга; 9 — сварочная ванна; 10 — основной металл свариваемой детали

стержня и покрытия. Расплавляющееся покрытие образует шлак и газы. Шлаковый слой предохраняет металл от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. Газы оттесняют воздух из зоны плавления (зоны дуги), обеспечивая дополнительную защиту расплавленного металла от контакта с воздухом.

Наиболее широко применяется ручная сварка электрической дугой прямого действия. Лучшие результаты достигаются при сварке короткой дугой, длина которой обычно не превышает 0,5...1,1 диаметра электрода, при токе 90...350 А и напряжении дуги 18...30 В. При большой длине дуги усиливаются окисление электродного металла и разбрызгивание, уменьшается глубина провара.

Электродные покрытия. Покрытый электрод для ручной дуговой сварки (рис. 1.11) представляет собой стержень длиной до 450 мм, изготовленный из сварочной проволоки, на поверхность которого нанесен слой покрытия. Левый конец электрода на участке длиной 20...30 мм освобожден от покрытия, что обеспечивает зажатие его в электрододержателе и электрический контакт. Торец другого конца также свободен от покрытия для возможности возбуждения дуги посредством касания изделия электродом в начале сварки.

Согласно ГОСТ 9466—75 в соответствии с отношением D/d различаются электроды с тонким ($D/d < 1,2$) — М, средним ($1,2 < D/d < 1,45$) — С, толстым ($1,45 < D/d < 1,8$) — Д и особо толстым ($D/d > 1,8$) — Г покрытием.

Электродное покрытие представляет собой смесь веществ, нанесенную на электрод для усиления ионизации, защиты от неблагоприятного воздействия среды и возможности металлургической обработки металла сварочной ванны. В покрытие вводятся ионизирующие, газо- и шлакообразующие, легирующие, раскисляющие, связующие компоненты, определяющие технологичность электрода при его изготовлении, и формовочные компоненты.

Ионизирующие (стабилизирующие) компоненты способствуют устойчивому горению дуги. Они содержат элементы с низким по-

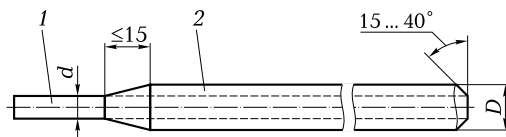


Рис. 1.11. Схема покрытого электрода для ручной дуговой сварки:

1 — стержень из электродной проволоки; 2 — покрытие; d — диаметр электродной проволоки; D — диаметр электрода

тенциалом ионизации, например калий и кальций (которые входят в состав мела, полевого шпата и гранита), натрий и др.

Газообразующие компоненты обеспечивают газовую защиту зоны дуги и сварочной ванны. К ним относятся органические (крахмал, пищевая мука, декстрин и др.) и неорганические (обычно карбонаты: мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 и др.) вещества. В результате разложения (диссоциации) органических веществ вблизи электрода при температуре более 200°C и неорганических веществ (карбонатов) при температуре примерно 900°C над сварочной ванной образуется газовое облако, обеспечивающее газовую защиту расплавленного металла от окисления.

Шлакообразующие компоненты вводятся в электродные покрытия для получения жидких шлаков. В качестве шлакообразующих компонентов используются руды и минералы: ильменит, рутил, полевой шпат, кремнезем, гранит, мрамор, плавиковый шпат.

Легирующие компоненты предназначены для улучшения механических характеристик металла шва, придания ему жаро- и износостойкости, коррозионной стойкости и других свойств. Легирующими элементами служат хром, марганец, титан, ванадий, молибден, никель, вольфрам. Легирующие элементы вводятся в покрытие в виде ферросплавов и чистых металлов.

Раскисляющие компоненты используются для восстановления (раскисления) части расплавленного металла, находящегося в виде оксидов на поверхности сварочной ванны. К раскисляющим компонентам относятся элементы, имеющие большее, чем железо (при сварке сталей), сродство к кислороду и другим элементам, оксиды которых требуется удалить из металла шва. Чаще всего раскислители вводятся в электродное покрытие в виде ферросплавов.

Связующие компоненты применяются для связывания порошковых составляющих покрытия в однородную вязкую массу, которая будет крепко удерживаться на стержне электрода при прессовке и которая образует прочное покрытие после сушки и прокаливания.

Ко всем электродным покрытиям предъявляются одинаковые требования: они должны обеспечивать стабильное горение дуги; получение металла шва с необходимым химическим составом и свойствами; спокойное, равномерное плавление электродного стержня и покрытия; формирование высококачественного шва без пор, шлаковых включений и других дефектов; легкую отделимость шлака от поверхности шва после остывания; удовлетворительные санитарно-гигиенические условия труда при сварке.

Виды электродных покрытий установлены ГОСТ 9466—75, в соответствии с которым различают следующие электроды: с кислым

покрытием (А), с основным покрытием (Б), с целлюлозным покрытием (Ц), с рутиловым покрытием (Р) и с покрытием прочего вида (П). При наличии покрытия смешанного вида используется соответствующее двойное обозначение. Если в покрытии содержится более 20 % железного порошка, то к обозначению вида покрытия добавляется буква «Ж».

У электродов с кислым покрытием (А) шлакообразующую основу составляют железные (гематит Fe_2O_3) и марганцевые (MnO_2) руды, а также кремнезем (SiO_2). Газовая защита расплавленного металла осуществляется органическими компонентами, сгорающими в процессе плавления электрода. Электроды с такими покрытиями непригодны для сварки сталей, легированных кремнием и другими элементами, так как интенсивно окисляются. При сварке спокойных низкоуглеродистых сталей с высоким содержанием кремния возможно образование пор. При сварке выделяется много токсичной пыли, содержащей оксиды марганца и кремния, и происходит сильное разбрызгивание металла.

У электродов с основным покрытием (Б) шлакообразующими компонентами являются карбонаты (мрамор, мел, магнезит) и фториды кальция (например, плавиковый шпат CaF_2). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается углекислым газом и оксидом углерода, образующимися при диссоциации карбоната кальция в процессе нагрева и плавления покрытия. В качестве раскислителей покрытие может содержать ферромарганец, ферросилиций, ферротитан и ферроалюминий.

Покрытия этого вида позволяют легировать расплавленный металл элементами с большим сродством к кислороду. Легирование марганцем и кремнием, осуществляемое при переходе их из ферромарганца и ферросилиция в сварочную ванну, придает соединению высокую прочность. Для легирования в покрытие можно вводить металлические порошки. Наличие в нем большого количества соединений кальция, хорошо связывающих серу и фосфор, которые затем выделяются в шлак, обеспечивает высокую чистоту наплавленного металла с малым содержанием серы и фосфора.

Электроды с целлюлозным покрытием (Ц) содержат до 50 % органических составляющих (целлюлоза, травяная мука и т.п.), что вызывает образование большого количества газов. В качестве шлакообразующих компонентов чаще всего применяются рутил, карбонаты и алюмосиликаты, иногда асбест ($\text{CaO} \cdot 3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2$), а для раскисления наплавленного металла — ферромарганец.

У электродов с рутиловым покрытием (Р) шлакообразующую основу составляют рутиловый концентрат, содержащий до 45 % ру-

тила (TiO_2); алюмосиликаты (слюда $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, полевой шпат $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, каолин $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и др.), карбонаты (мрамор CaCO_3 и магнезит MgCO_3). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается введением до 5 % органических соединений и диссоциацией карбонатов.

Электроды с рутиловым покрытием, обладая хорошими сварочно-технологическими свойствами, обеспечивают условия для формирования шва с плавным переходом к основному металлу, малое разбрызгивание расплава, легкую отделимость шлака, сварку во всех пространственных положениях, стабильное горение дуги на постоянном и переменном токах.

Классификация и условные обозначения электродов. Электроды, предназначенные для ручной дуговой сварки, в стандартах классифицируются по следующим признакам: металл, для сварки которого они предназначены; толщина и тип покрытия; механические свойства металла шва.

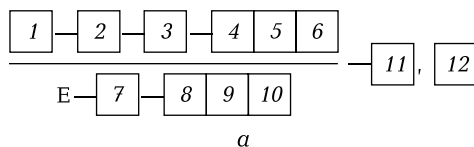
Согласно ГОСТ 9466—75 выпускаются электроды 116 типов. Электроды для сварки и наплавки сталей в соответствии с назначением подразделены на следующие классы: У — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, имеющих временное сопротивление разрыву (предел прочности) $\sigma_b < 600$ МПа (60 кгс/мм^2); Л — для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_b > 600$ МПа; Т — для сварки теплоустойчивых сталей; В — для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами; Н — для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Этот стандарт регламентирует размер электродов, толщину и тип покрытий, условные обозначения, общие технические требования, правила приемки и методы испытания электродов.

По допустимым пространственным положениям сварки или наплавки электроды подразделяются на четыре вида: для всех положений — индекс 1; для всех положений кроме вертикального сверху вниз — 2; для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх — 3; для нижнего и нижнего «в лодочку» — 4. Электроды обозначаются в зависимости от рода тока, применяемого при сварке, а также от его полярности (при постоянном токе) или номинального напряжения холостого хода источника питания сварочной дуги (при переменном токе частотой 50 Гц). Обозначения электродов приведены в табл. 1.2.

Условное обозначение электрода должно содержать данные, расположенные в определенном порядке (рис. 1.12). Такое полное условное обозначение обязательно указывается на этикетках или

Таблица 1.2. Обозначение электродов в зависимости от рода и полярности сварочного тока

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника питания, В		Обозначение электрода
	Номинальное	Пределы отклонений	
Обратная	50	±5	0
Любая			1
Прямая			2
Обратная			3
Любая	70	±10	4
Прямая			5
Обратная			6
Любая	90	±5	7
Прямая			8
Обратная			9



а

$\frac{\text{Э46А—УОНИ 13/45—3,0—УД2}}{\text{Е—432 (5)—Б10}}$ —ГОСТ 9466—75, ГОСТ 9467—75

б

Рис. 1.12. Структура условного обозначения покрытых электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей согласно ГОСТ 9466—75 (а) и пример маркировки электрода типа Э64А (б):

1 — тип; 2 — марка; 3 — диаметр; 4 — назначение электрода; 5 — толщина покрытия; 6 — группа электродов; 7 — группа индексов в соответствии с характеристиками наплавленного металла и металла швов (по ГОСТ 9466—75, ГОСТ 10052—75 или ГОСТ 10051—75); 8 — вид покрытия; 9 — допустимые пространственные положения сварки; 10 — род тока, применяемого при сварке, полярность постоянного тока и номинальное напряжение холостого хода источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц; 11 — стандарт по классу стали (ГОСТ 9466—75); 12 — стандарт на тип электрода (ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75, ГОСТ 10052—75)

в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами, а также приводится во всех видах документации.

Технология сварки. Подготовка кромок под ручную дуговую сварку производится с помощью газовых резаков или ручного металлообрабатывающего инструмента. В стыковых соединениях допускается превышение A кромок друг над другом:

$$A = 0,1s. \quad (1.6)$$

При сварке встык листов неодинаковой толщины на более толстой детали делается скос с одной или с обеих сторон листа. Листы толщиной до 6...8 мм можно сваривать встык с одной стороны, до 12...14 мм — с двух сторон без разделки кромок. Листы толщиной более 15 мм обычно свариваются с разделкой кромок. Форма разделки должна обеспечить возможность свободного манипулирования электродом при возможно меньшем объеме шва. Сварка с разделкой кромок может также выполняться с двух сторон. Это даже предпочтительнее, так как уменьшаются объем наплавленного металла, расход электродов, тепловложение в деталь, а также деформации.

При возбуждении дуги напряжение между электродом и свариваемым изделием должно быть 60 В, реже 70 В — для электродов некоторых марок. Возбуждение дуги осуществляется путем кратковременного касания изделия концом электрода. Существует два основных способа зажигания: «клевок» и «чирком». При первом способе торцом электрода с небольшим усилием ударяют в месте сварки, затем отводят электрод вверх на высоту 4...5 мм либо вбок и приподнимают его на такую же высоту. При втором способе торцом электрода чиркают по месту сварки так, чтобы в конце движения торец оказался над кромкой.

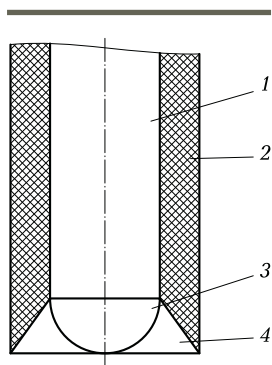


Рис. 1.13. Торец оплавленного электрода:

1 — стержень; 2 — покрытие; 3 — оплавленный торец стержня; 4 — козырек покрытия

Второй способ возбуждения дуги используется на только что сменном электроде. Через некоторое время после возбуждения дуги на покрытии торца оплавленного электрода образуется козырек (рис. 1.13). При повторном возбуждении дуги козырек следует разрушить резким ударом торца электрода о свариваемую деталь. Если расстояние между торцом электрода и кромкой в момент возбуждения дуги будет больше 5...6 мм, то дуга может не возникнуть. В мо-

мент отрыва электрода источник питания должен обеспечить быстрый рост напряжения до 20 ... 25 В, что необходимо для возбуждения дуги.

После возбуждения дугу необходимо перемещать так, чтобы обеспечить проплавление кромок и получить заданный объем наплавленного металла. Для этого длина дуги поддерживается постоянной, а электрод по мере расплавления равномерно подается к изделию. Уменьшение длины дуги ухудшает формирование шва и может вызвать короткое замыкание электрода на деталь. Увеличение длины дуги приводит к уменьшению глубины провара, разбрызгиванию металла электрода, увеличению растворения газов в металле шва, ухудшению его качества и образованию пор.

При прямолинейном поступательном движении электрода ширина e шва обычно составляет

$$e = (0,8 \dots 1,5)d_3, \quad (1.7)$$

где d_3 — диаметр электродного стержня.

Такие швы предпочтительны при сварке корневого стыка с разделкой или тонкого металла. Нормально сформированный шов обычно шире:

$$e = (3 \dots 5)d_3. \quad (1.8)$$

Уширение шва достигается перемещением конца электрода поперек шва по различным траекториям (рис. 1.14).

Швы длиной до 250 мм условно считаются короткими, 250 ... 1 000 мм — средними, более 1 000 мм — длинными. При ручной дуговой сварке в подавляющем большинстве случаев выполняются короткие и средние швы. Короткие швы выполняются сваркой «на проход», средние в случае вероятности деформаций — сваркой

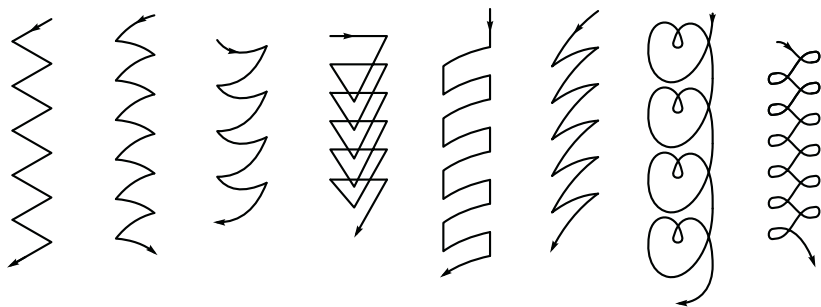


Рис. 1.14. Траектории движения конца электрода поперек шва при сварке

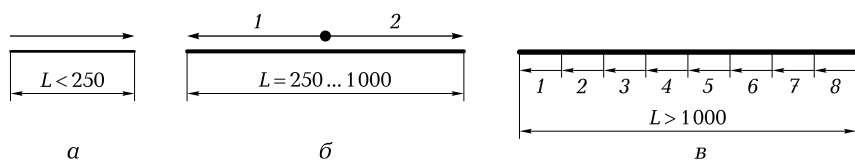


Рис. 1.15. Способы выполнения швов различной длины:

а — «на проход»; *б* — от середины к краям; *в* — обратноступенчатый; 1–8 — последовательность выполнения швов

от середины к краям или, как и длинные, обратноступенчатым способом (рис. 1.15). В последнем случае шов делится на участки, которые свариваются последовательно в направлении, обратном общему направлению сварки, с перекрытием каждым последующим участком начала предыдущего. Длину участков лучше выбирать такой, чтобы весь участок сваривался одним электродом (100...300 мм) и чтобы переход от участка к участку совмещался со сменой электрода, что экономит время.

Число проходов при сварке выбирается в зависимости от толщины кромок стыкового соединения или заданной величины катета шва углового соединения (табл. 1.3).

Заполнение разделки при многопроходной сварке деталей большой толщины можно вести узкими валиками, если необходимо уменьшить тепловое воздействие на металл от каждого прохода

Таблица 1.3. Выбор числа проходов при сварке стыковых и угловых соединений

Стыковые соединения		Угловые соединения	
Толщина кромок, мм	Число проходов без подварки	Величина катета шва, мм	Число проходов без подварки
2	1	2	1
4	1	6	1
6	1...2	8	1
8	2...3	10	1...2
10	2...3	12	3
12	3...4	14	3...4
14	3...5	16	4...5
16	4...6	18	5...6
18	5...6	20	5...6
20	5...7	22	6...7

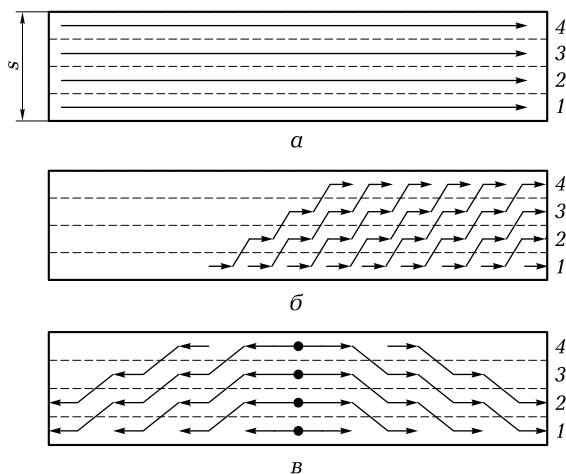


Рис. 1.16. Способы заполнения разделки при многопроходной сварке: а — вразброс; б — каскадный; в — горкой; 1—4 — номера слоев; s — толщина кромок

да, например при сварке коррозионно-стойких сталей. Если сталь не склонна к ухудшению свойств при перегреве, то заполнение разделки можно вести широкими валиками. Для уменьшения напряжений и деформаций детали заполнение разделки можно вести вразброс, каскадным способом и горкой (рис. 1.16). При каскадном способе стык деталей разбивается на короткие участки, и при окончании сварки на каждом последующем участке шов накладывается на еще не остывший ранее наложенный слой предыдущего участка. Сварка горкой является разновидностью каскадного способа и ведется от середины стыка к краям; лучшие результаты достигаются при работе двух сварщиков.

Если в конце шва сразу оборвать дугу, то кратер сварочной ванны останется в шве в виде углубления. В кратере во время кристаллизации металла при его усадке возникают трещины, раковины и другие дефекты. Поэтому при завершении шва нужно на некоторое время прервать перемещение электрода, а затем постепенно поднимать его до обрыва дуги.

Режимы сварки. Режимом сварки называются основные характеристики сварочного процесса, обеспечивающие получение сварных швов заданных размеров, формы и качества.

Основные параметры при ручной дуговой сварке: диаметр электрода, сила сварочного тока, напряжение дуги, скорость сварки, род и полярность тока. К числу дополнительных параметров относятся

Таблица 1.4. Рекомендуемые диаметры электрода при ручной дуговой сварке различных соединений

Толщина кромок (при стыковом соединении), мм	Величина катета шва (при угловом и тавровом соединении), мм	Рекомендуемый диаметр электрода, мм
1,5... 2,0	—	1,6... 2,0
3,0	3,0	3,0
4,0... 8,0	4,0... 5,0	4,0
9,0... 12,0	—	4,0... 5,0
13,0... 15,0	6,0... 8,0	5,0
16,0... 20,0	—	5,0... 6,0
20,0	—	6,0... 8,0

длина дуги, амплитуда, частота и форма колебаний конца электрода. Определение параметра режима сварки начинается с выбора диаметра электрода в зависимости от толщины свариваемых кромок и вида соединения (табл. 1.4). При сварке угловых и тавровых соединений величина катета шва не может быть больше 8 мм за один проход, так как за счет силы тяжести металл стекает на полку, искажая форму шва. При этом возможно излишнее оплавление или подрез стенки.

При большой величине катетов применяется многопроходная сварка. Первый проход выполняется обычно электродом меньшего диаметра, чем остальные проходы.

Сила сварочного тока выбирается в зависимости от диаметра электрода d_3 :

$$I = (20 + 6d_3)d_3,$$

или по упрощенной формуле

$$I = 40d_3.$$

Это ориентировочное значение силы тока, которое корректируется в зависимости от свариваемого материала и особенностей соединения. Например, при сварке высоколегированных сталей для уменьшения перегрева металла сила тока уменьшается на 20... 30%. Минимальный ток должен обеспечивать нагрев и плавление торца электрода; максимальный ток не должен перегревать электрод по всей длине и вызывать осыпание покрытия.

При измерении силы тока меняется глубина проплавления. При увеличении силы тока растет давление дуги, больший объем жид-

кого металла вытесняется из-под дуги, глубина проплавления увеличивается.

Напряжение дуги зависит от характеристик источника питания, материала электрода и изделия. Его можно изменять, меняя длину дуги. Обычно напряжение дуги составляет 20...30 В. Повышение напряжения дуги за счет увеличения ее длины приводит к снижению силы тока и глубины провара и увеличению ширины шва.

Скорость ручной дуговой сварки зависит от квалификации сварщика и обычно выбирается в диапазоне 4...8 м/ч. С увеличением скорости сварки снижаются глубина провара и ширина шва. Влияние скорости компенсируется увеличением силы тока.

При сварке стальных деталей на постоянном токе нужно учитывать магнитное дутье, которое ухудшает формирование шва. Дуга выдувается из контура, образованного электродом, деталью и подающим электрододержателем. Поэтому при сварке нужно подключать электрододержатель в зоне сварки, применять по возможности сварку на переменном токе и, если позволяют условия формирования шва, располагать электрод под углом к поверхности детали, близким к 90° .

Сварку стыковых швов в нижнем положении ведут обычно с наклоном электрода углом вперед по направлению его перемещения под углом 15...30° к вертикали. Это обеспечивает равномерное покрытие жидкого металла слоем шлака и предотвращает затекание шлака на нерасплавленный металл перед дугой. Наклон электрода углом назад по направлению, обратному его перемещению, применяется при необходимости увеличить глубину проплавления. При этом из-под дуги ее давлением вытесняется больший объем металла сварочной ванны, что увеличивает проплавление, однако ухудшает качество шва и ослабляет его защиту.

Основная трудность при сварке в нижнем положении — равномерное проплавление с обратной стороны стыка. При недостаточной силе тока или большой длине дуги возникает непровар; чрезмерная сила тока вызывает прожог и провисание проплава. Поэтому в ответственных соединениях необходимо проваривать стык с обратной стороны шва или сваривать его на подкладке, устанавливаемой под кромки деталей. Это позволяет увеличивать силу тока, что повышает производительность. Подкладка может быть медной, медно-флюсовой (с канавкой, заполненной флюсом), керамической, стальной или выполненной из свариваемого материала — остающейся. Лучшее положение при сварке угловых и тавровых швов — «в лодочку».

При сварке во всех пространственных положениях кроме нижнего основную проблему составляет стекание жидкого металла

и шлака под действием силы тяжести. Это искажает форму шва, ухудшает его защиту и, следовательно, качество. Силе тяжести противодействует сила давления дуги и сила поверхностного натяжения жидкого металла сварочной ванны. Поверхностное натяжение увеличивается почти по квадратичной зависимости с уменьшением объема сварочной ванны. Следовательно, уменьшить влияние силы тяжести можно уменьшением объема сварочной ванны. Для этого при сварке в потолочном, вертикальном и горизонтальном положениях необходимо выбирать электроды диаметром меньше, чем при сварке в нижнем положении (менее 4 мм). Лучше, если электрод будет обеспечивать меньшее количество расплавляемого в единицу времени металла — не более 10 г/(А·ч). Такой коэффициент расплавления имеют электроды ВИАМ-25, УОНИ-13.

Сварка вертикальных швов выполняется при перемещении электрода снизу вверх или сверху вниз. Удобнее сваривать снизу вверх. В этом случае дуга возбуждается в нижней точке стыка. После образования сварочной ванны электрод следует несколько поднять и расположить углом вперед по отношению к шву. При этом затвердевший металл образует как бы полочку, на которой удерживаются капли электродного металла. При сварке сверху вниз дуга возбуждается в верхней точке шва. После образования сварочной ванны электрод следует наклонить на угол 10...15° в сторону наплавленного металла. Сварку ведут как можно более короткой дугой с небольшими поперечными колебаниями.

Горизонтальные швы сваривать труднее, чем вертикальные. Как правило, применяются V- и К-образные разделки со скосом одной верхней кромки. Сила сварочного тока должна быть наименьшей.

Труднее всего сваривать потолочные швы. Для облегчения условий переноса капель электродного металла сварку необходимо вести короткой дугой при силе тока на 20...25 % меньше, чем в нижнем положении. Пониженные режимы и неудобство работы резко снижают производительность сварки в потолочном положении, поэтому его следует по возможности избегать.

1.3. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА

Особенности способа. Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса успешно применяется при изготовлении резервуаров и тонкостенных труб для нефтепроводов. Широкое применение этого способа в промышленности объясняется высокой производи-

тельностью процесса, высоким качеством и стабильностью свойств сварного соединения, улучшенными условиями работы, экономным расходом сварочных материалов и электроэнергии.

К недостаткам способа относится возможность сварки только в нижнем положении, что обусловлено стеканием расплавленного флюса и металла при отклонении плоскости шва от горизонтали более чем на $10 \dots 15^\circ$.

Чаще всего применяется сварка с использованием одного электрода — однодуговая сварка. Сварочная дуга горит между электродной проволокой 2 и деталью, находящейся под слоем флюса 1 (рис. 1.17). В расплавленном флюсе 7 газами и парами флюса и расплавленного металла образуется полость — газовый пузырь 4, в котором горит сварочная дуга. Давление газов в газовом пузыре в сочетании с механическим давлением, создаваемым дугой, оказывается достаточным для оттеснения жидкого металла из-под дуги, что улучшает теплопередачу от нее к основному металлу. С повышением силы сварочного тока увеличивается механическое давление дуги и глубина проплавления основного металла $h_{\text{пр}}$.

Кристаллизация расплавленного металла сварочной ванны 8 приводит к образованию сварного шва 6. Затвердевший флюс образует шлаковую корку 5 на поверхности шва. Расплавленный флюс, образуя пузырь и покрывая поверхность сварочной ванны, эффективно защищает расплавленный металл от взаимодействия с воздухом. Металлургические взаимодействия между расплавленным металлом и шлаком способствуют получению металла шва с требуемым химическим составом.

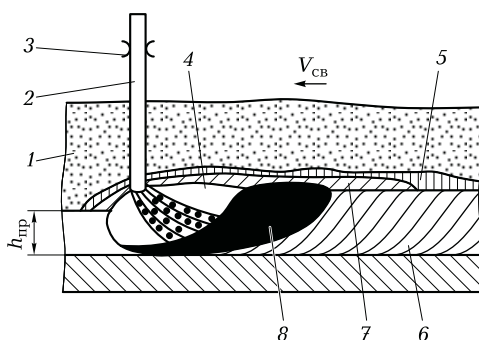


Рис. 1.17. Сварка под слоем флюса:

1 — слой флюса; 2 — электродная проволока; 3 — скользящий контакт; 4 — газовый пузырь; 5 — шлаковая корка; 6 — сварной шов; 7 — расплавленный флюс; 8 — сварочная ванна

Подвод тока к электродной проволоке 2 осуществляется через скользящий контакт 3 на расстоянии до 70 мм от дуги (вылет электрода). Это позволяет без перегрева электрода использовать сварочные токи до 2000 А. Плотность сварочного тока достигает $200 \dots 250 \text{ А/мм}^2$, в результате чего повышается глубина проплавления основного металла и скорость расплавления электродной проволоки, т. е. достигается высокая производительность.

Сварку под слоем флюса можно выполнять на переменном и постоянном токе. Подача электродной проволоки в дугу и перемещение дуги относительно стыка выполняются специальными механизмами.

В некоторых случаях целесообразно применение двухдуговой или многодуговой сварки под слоем флюса. При этом все дуги питаются от одного источника или каждая дуга от отдельного источника.

При сварке сдвоенным (расщепленным) электродом (рис. 1.18, а) дуги питаются от одного источника. Это несколько повышает производительность сварки за счет повышения количества расплавленного электродного металла. Electroды могут быть расположены последовательно или перпендикулярно по отношению к направлению сварки. При последовательном расположении глубина

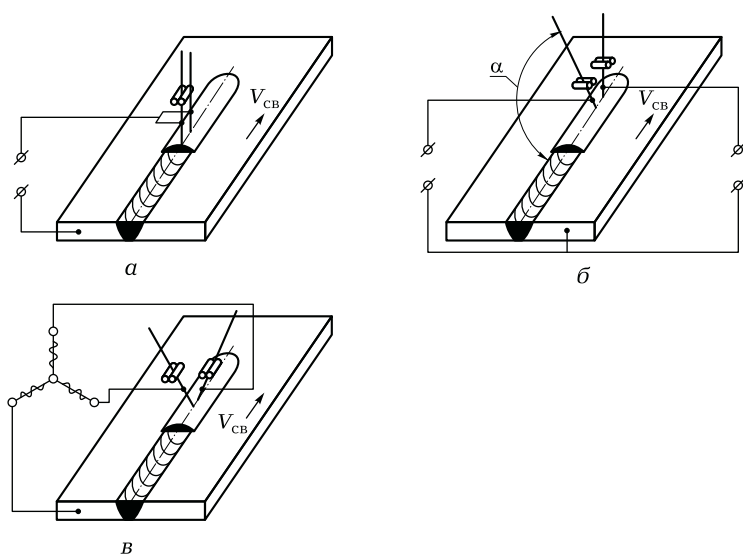


Рис. 1.18. Схемы образования шва при сварке под слоем флюса сдвоенным электродом (а), двухдуговой сварке (б) и трехфазной дугой (в)

проплавления шва несколько увеличивается, а при перпендикулярном — уменьшается. Вторым вариантом расположения электродов позволяет выполнять сварку при повышенных зазорах между кромками. Изменяя расстояние между электродами, можно регулировать форму и размеры шва. Недостатком способа является некоторая нестабильность горения дуги.

При двухдуговой сварке (рис. 1.18, б) используются два электрода. Дуги могут нагревать общую сварочную ванну или отдельные ванны (когда металл шва после нагрева первой дуги уже полностью кристаллизовался). Обычно при нагреве дуг отдельных ванн оба электрода перпендикулярны плоскости свариваемых кромок. Изменяя расстояние между дугами, можно регулировать термический цикл сварки, что важно при сварке конструкций из закаленных сталей.

Двухдуговая сварка может вестись на высоких скоростях, в то время как применение повышенного тока при однодуговой сварке приводит к несплавлениям — подрезам по кромкам шва. При двухдуговой сварке вторая дуга, нагревающая отдельную ванну электродом, наклоненным углом вперед (угол $\alpha = 45 \dots 60^\circ$), частично переплавляет шов, сформированный первой дугой, и образует уширенный валик без подрезов. Использование разнородного тока для питания дуг (для одной дуги — переменный, для другой — постоянный) позволяет уменьшить магнитное дутье.

При сварке на переменном токе возникает трехфазная дуга (рис. 1.18, в): одна дуга горит между электродами (независимая дуга), а каждая из двух других — между своим электродом и деталью. Все дуги горят в одном плавильном пространстве. Регулируя ток в каждой дуге, можно изменять количество расплавленного электродного металла или проплавление основного металла. Регулирование тока в каждой дуге для изменения количества расплавленного металла удобно при выполнении швов, требующих большого количества электродного металла. Недостаток способа — необходимость точного согласования скоростей подачи электродов.

Используемые материалы. Для дуговой сварки под флюсом применяются электродная проволока и флюс. В качестве электродной служит такая же проволока, что и при других способах сварки плавлением. Может применяться также порошковая проволока, формованная из ленты в трубку, внутрь которой запрессован флюс. В последнее время разработаны композитные проволоки с оболочкой из пластмассы и сердцевиной из смеси флюса и железного порошка. Достоинство такой проволоки — полное отсутствие гигроскопичности.

Сварочный флюс должен хорошо защищать капли электродного металла и жидкий металл сварочной ванны от воздействия воздуха; обеспечивать устойчивое горение дуги, хорошее качество шва и образование шлаковой корки, легко отделимой от поверхности шва после затвердевания; обеспечивать заданные химический состав и механические свойства металла шва. При плавлении из флюса не должно выделяться большого количества газов и пыли.

Флюсы классифицируются по назначению, химическому составу и способу изготовления.

По назначению флюсы подразделяются на три группы: для сварки углеродистых и легированных сталей, для сварки высоколегированных сталей, для сварки цветных металлов и сплавов. Внутри этих групп флюсы могут различаться по размеру частиц. В зависимости от диаметра электродной проволоки используются соответствующие флюсы: чем больше диаметр проволоки, тем крупнее частицы флюса.

По химическому составу в зависимости от соотношения соответствующих оксидов флюсы подразделяются на кислые и основные.

По способу изготовления флюсы подразделяются на плавленные и неплавленные. Неплавленные флюсы изготавливаются без плавления компонентов шихты. К неплавленным относятся флюсы керамические и изготовленные путем измельчения природных минералов. Керамические флюсы изготавливаются из тех же компонентов, что и электродные покрытия. Их замешивают на жидком стекле, а затем спекают и дробят. Недостаток таких флюсов — низкая прочность зерен (много отходов, мелких фракций) и возможная неоднородность состава из-за разделения веществ с разным удельным весом при их перемешивании.

Плавленные флюсы применяются чаще, особенно высококремнистые и марганцевые флюсы АН-348А и ОСЦ-45. Эти флюсы изготавливаются путем совместного плавления песка (SiO_2), марганцевой руды (MnO), плавикового шпата (CaF_2), магнезита (MgO). Жидкий расплав флюса выливают в изложницу или воду, обеспечивая грануляцию флюса.

Для сварки низколегированных низкоуглеродистых сталей используются улучшающие легирующие флюсы; для сварки высоколегированных сталей — более нейтральные флюсы, состоящие из бескислородных соединений типа фторида кальция. Однако формирование швов с использованием таких флюсов несколько хуже, чем с использованием флюсов с активными компонентами. Плавленные флюсы бывают стекловидными и пемзовидными и различаются формой частиц и степенью раскисления. Стекловид-

ный флюс лучше защищает зону сварки, однако при использовании пемзовидного флюса качество шва лучше.

Химический состав металла шва зависит от химической активности флюса и состава электродной проволоки. Поэтому для сварки конструкций из конкретной стали необходимо выбирать одновременно флюс и проволоку, т. е. выбирать систему флюс — проволока. Основным критерием при выборе системы является содержание 0,2...0,4 % кремния и марганца в металле шва. Например, при сварке конструкций из углеродистых и низколегированных сталей можно использовать три основные системы:

- низкоуглеродистая проволока (Св-08, Св-08А) и высокомарганцовистый высококремнистый флюс (35...40 % MnO и 40...45 % SiO₂). Легирование кремнием и марганцем будет происходить за счет флюса;
- низкоуглеродистая проволока с содержанием до 2 % марганца (например, Св-20Г2) и высококремнистый флюс с небольшим содержанием марганца (40...42 % SiO₂ и не более 15 % MnO). Легирование шва марганцем будет происходить за счет проволоки, а кремнием — за счет флюса;
- среднемарганцовистая проволока (примерно 30 % MnO) и среднемарганцовистый высококремнистый флюс (примерно 30 % MnO и 40...45 % SiO₂). Марганец будет переходить в шов из проволоки и флюса, кремний — из флюса.

Количество переходящих в шов легирующих элементов зависит и от параметров режима сварки. Чем больше будет вокруг сварочной ванны расплавленного флюса, тем больше легирующих элементов перейдет из него в шов.

Технология сварки. Основными параметрами режима дуговой сварки под слоем флюса являются сила сварочного тока, его род и полярность, напряжение дуги, скорость сварки, диаметр и скорость подачи электродной проволоки. К дополнительным параметрам относятся вылет электрода (расстояние от его торца до мундштука горелки), угол наклона электрода или детали, марка флюса, вид разделки и подготовки кромок, вид сварного соединения.

С увеличением силы сварочного тока возрастает давление дуги, вследствие чего жидкий металл сварочной ванны более интенсивно вытесняется из-под электрода и дуга погружается вглубь основного металла. Глубина проплавления основного металла при этом увеличивается, дуга укорачивается и становится менее подвиж-

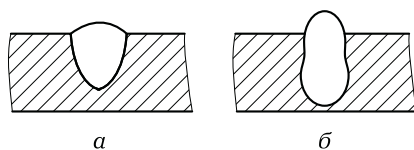


Рис. 1.19. Форма сварного шва при нормальной (а) и повышенной (б) силе сварочного тока

ной. Вследствие этого ширина шва остается неизменной, несмотря на увеличение объема сварочной ванны. Швы становятся глубокими, но не широкими (рис. 1.19). Высота выпуклости такого шва велика, так как возрастает количество электродного металла, расплавленного в единицу времени. Такие швы менее стойки к образованию трещин и плохо работают при вибрационных нагрузках. К тому же с ростом силы тока при неизменных остальных условиях уменьшается количество расплавляемого флюса.

С увеличением диаметра электродной проволоки при неизменной силе сварочного тока усиливается блуждание дуги по торцу электрода и поверхности сварочной ванны, вследствие чего ширина сварочной ванны увеличивается, а глубина проплавления уменьшается. Уменьшение диаметра электродной проволоки при неизменной силе тока, напротив, способствует увеличению глубины проплавления и уменьшению ширины шва.

С повышением напряжения на дуге при неизменной силе сварочного тока увеличивается длина и подвижность дуги, в результате чего значительно увеличивается ширина шва и уменьшается высота усиления. Глубина проплавления уменьшается незначительно.

Таким образом, сила сварочного тока и напряжение дуги оказывают противоположное действие на форму шва. Поэтому для получения шва оптимальной формы увеличение силы сварочного тока при увеличении толщины свариваемой детали должно обязательно сопровождаться соответствующим повышением напряжения дуги.

С увеличением скорости сварки столб дуги отклоняется в сторону, противоположную направлению сварки, из-под дуги вытесняется больше жидкого металла и толщина его слоя уменьшается. Жидкий металл под дугой имеет высокое термическое сопротивление и препятствует поступлению теплоты от дуги к нерасплавленному металлу. Поэтому при увеличении скорости сварки вначале наблюдается увеличение глубины проплавления. При дальнейшем увеличении скорости сварки влияние уменьшения погонной энергии (количество энергии на единицу длины шва) становится преоб-

ладающим, в результате чего глубина провара и площадь сечения шва уменьшаются. С увеличением скорости сварки V_{CB} уменьшаются остальные размеры шва, включая его ширину (рис. 1.20). Уменьшается также расстояние l от электрода до переднего края сварочной ванны.

При сварке с наклоном электрода углом вперед жидкий металл вытесняется из-под дуги, глубина проплавления увеличивается, при наклоне углом назад — уменьшается. Если электрод расположен вертикально, а деталь наклонена и сварка ведется снизу вверх («в горку»), то глубина проплавления увеличивается. При сварке «под горку» глубина проплавления уменьшается, но шов становится шире.

Толщина кромки свариваемой детали и ее начальная температура также влияют на формирование шва: при сварке нагретых деталей получается широкий и низкий шов, при сварке холодных деталей шов значительно уже и выше. При сварке деталей большой толщины швы уже и выше, чем при сварке деталей малой толщины. Если глубина проплавления составляет примерно 75 % толщины свариваемой детали, то даже относительно небольшое местное умень-

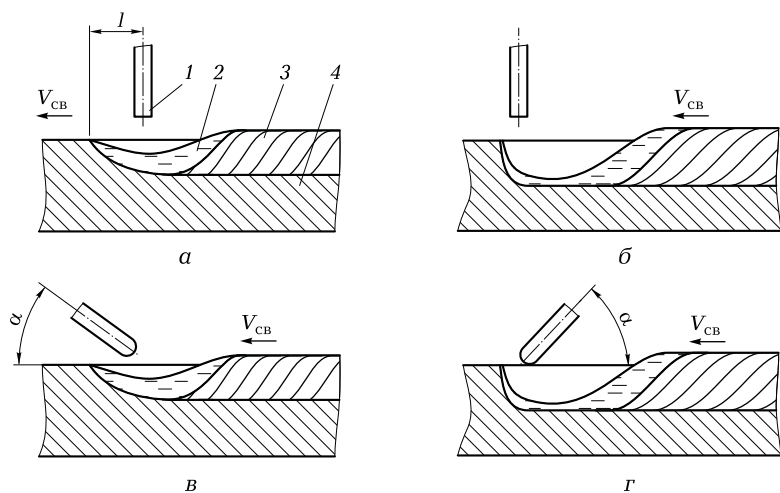


Рис. 1.20. Форма сварочной ванны при малой (а) и большой (б) скорости сварки, при сварке с наклоном электрода углом вперед (в) и углом назад (г):

1 — электродная проволока (электрод); 2 — сварочная ванна; 3 — сварной шов; 4 — свариваемая деталь; α — угол наклона электродной проволоки; l — расстояние от электрода до переднего края сварочной ванны

шение ее толщины (например, лыска или выточка) может привести к скачкообразному увеличению глубины провара и прожогам.

Стыковые швы обычно стремятся выполнять за один проход, но при сварке, например, закаленных или некоторых высоколегированных сталей требуется несколько проходов, чтобы ограничить количество теплоты, поступающей в свариваемую деталь. Кроме того, детали большой толщины сварить за один проход часто не удастся. Если сталь не чувствительна к перегреву, то стыковые соединения толщиной до 20 мм можно сваривать за один проход односторонним швом без разделки кромок. Для обеспечения полного провара в стыке деталей шириной 5...6 мм сварка ведется по зазору. Если зазор отсутствует, то возможна односторонняя сварка деталей толщиной до 14 мм без разделки кромок.

Для предотвращения прожогов при сварке и формировании провара односторонние соединения свариваются «в замок» или на остающейся стальной подкладке (рис. 1.21). «В замок» свариваются кольцевые соединения толстостенных цилиндрических сосудов и труб небольшого диаметра, на остающейся подкладке — стыковые соединения листов толщиной до 10 мм при невозможности вести двухстороннюю сварку. При сварке подкладка частично оплавляется и приваривается к нижней части кромок. Остающаяся подкладка обычно выполняется из материала свариваемой детали.

Используются также асбестовые и медные подкладки, которые после сварки убираются. Стыки с обратной стороны иногда заделываются огнеупорным материалом. При сварке на флюсовой подушке к обратной стороне стыка поджимается слой флюса, препятствующий вытеканию расплавленного металла. Форма и сечение провара определяются равномерностью зазора в стыке и усилием поджатия флюсовой подушки с помощью специальных устройств (рис. 1.22). При слабом поджатии подушки шов получается ослабленным с выпуклым обратным валиком. При чрезмерном поджатии возможна вогнутость шва с обратной стороны. При сварке тонких листов толщиной до 10 мм флюс подушки поджимается с помощью

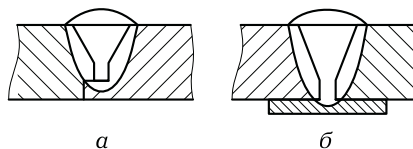


Рис. 1.21. Схемы формирования провара при сварке «в замок» (а) и на остающейся стальной подкладке (б)

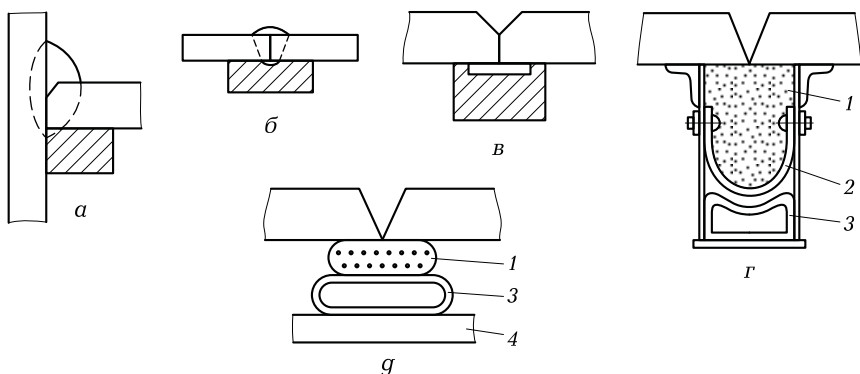


Рис. 1.22. Схемы устройств для формирования провара:

а, б — медные подкладки для углового и стыкового швов; *в* — медная подкладка с канавкой; *г, д* — насыпная и формованная флюсовые подушки; *1* — флюс; *2* — брезентовая прокладка; *3* — надувной шланг; *4* — поддерживающая планка

резиновых шлангов, в которые подается воздух. При сварке массивных конструкций из листов (на остающейся стальной подкладке) флюсовая подушка поджимается массой самой свариваемой конструкции. Флюсовые подушки при сварке (табл. 1.6) обеспечивают лучшее качество шва.

В тех случаях, когда нельзя использовать подкладку или когда сварку приходится вести по неравномерному зазору, применяется односторонняя сварка под слоем флюса с предварительной заваркой корня шва с обратной стороны или со стороны основного прохода.

Сварку одним электродом можно производить со скоростью не более 45 м/ч. В некоторых случаях нужны более высокие ско-

Таблица 1.6. Режимы сварки на флюсовой подушке соединений из углеродистых сталей

Толщина листов, мм	Ширина зазора в стыке, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
			при переменном токе	при постоянном токе обратной полярности	
10	3...4	700...750	34...36	32...34	30
12	4...5	750...800	36...40	34...36	27
14	4...5	850...900	36...40	34...36	25
16	5...6	900...950	38...42	36...38	20
18	5...6	950...1000	40...44	36...40	17
20	5...6	950...1000	40...44	36...40	15

рости, например при производстве сварных труб большого диаметра. Увеличение скорости в этом случае можно получить путем увеличения мощности дуги. Однако при силе сварочного тока более 1 300... 1 500 А получить качественный шов без подрезов и в то же время с достаточной глубиной проплавления нельзя.

Увеличение скорости сварки возможно лишь при двухдуговой сварке. Электроды необходимо располагать только вдоль оси шва: первый — вертикально (это обеспечит необходимую глубину провара), второй — с наклоном назад от направления движения (это обеспечит достаточную ширину шва и плавный переход от металла шва к основному металлу). Обе дуги питаются от независимых источников постоянного тока обратной полярности. Таким способом можно увеличить скорость сварки до 120 м/ч. Двумя дугами можно сваривать стыковые соединения из металла толщиной до 14 мм за один проход, причем в стыке должен быть зазор. Сварку необходимо вести на флюсовой или флюсомедной подкладке. Для увеличения скорости сварки более 140 м/ч применяются одновременно три дуги. Режимы двухдуговой сварки стыковых соединений приведены в табл. 1.7.

Возбуждение дуги при сварке под слоем флюса производится путем включения сварочного тока при электроде, предварительно замкнутом на свариваемую конструкцию. Если используется автомат с регулированием скорости подачи проволоки по напряжению дуги, то при включении тока электродная проволока короткое время перемещается вверх, способствуя возбуждению дуги, затем реверсируется и подается в дугу с заданной скоростью. При постоянной скорости подачи проволоки дуговой промежуток образуется в результате взрыва мгновенно разогреваемой током короткого замыкания перемычки

Таблица 1.7. Режимы двухдуговой сварки стыковых соединений

Толщина листов, мм	Ширина зазора, мм	Диаметр электрода, мм	Расположение электродов	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
8	3... 4	3... 4	Вертикальное	800... 850	36... 40	80
			Наклонное	850... 870	46... 48	80
8	3... 4	4... 5	Вертикальное	1 500... 1 550	45... 50	120
			Наклонное	1 000... 1 100	42... 48	120
14	4... 5	5... 6	Вертикальное	2 000... 2 100	40... 42	120
			Наклонное	1 700... 1 800	56... 60	120

на торце электрода, замкнутого на свариваемую конструкцию. В образовавшемся нагретом промежутке возбуждается дуга, длина которой устанавливается и поддерживается за счет саморегулирования.

В процессе сварки необходимо следить за точностью направления электрода по оси стыка или по заданному направлению. Так как при сварке под слоем флюса дуга не видна, то заданное направление электрода определяется по указателям (в виде штифта или светового пятна), движущимся впереди электрода на одной линии с ним по копирному ролику. При этом копирный ролик перемещается по разделке. Применяются также устройства с фотоэлементами.

Техника заваривания кратера при окончании шва зависит от конструкции автомата. Если сварка производится на установках с неподвижным автоматом и перемещающейся свариваемой конструкцией, то при подходе дуги к концу шва прекращают перемещение конструкции и, не отключая ток, прекращают подачу электродной проволоки до естественного обрыва дуги. Если используется сварочный трактор, а свариваемая конструкция неподвижна, то при подходе дуги к концу шва прекращают перемещение трактора и в течение некоторого времени продолжают сварку на месте. Затем, не отключая ток, прекращают подачу проволоки, дуга растягивается до естественного обрыва.

В отдельных случаях применяется автоматическая однопроводная сварка листов толщиной более 40 мм. При этом объем и глубина сварочной ванны велики, выделение газов затрудняется, увеличивается вероятность порообразования. Поэтому при однопроводной сварке листов мощными дугами используются флюсы с повышенной газопроницаемостью и толстая электродная проволока диаметром до 8... 12 мм. Сварку ведут при повышенном напряжении дуги, чтобы получить швы нормальной чашеобразной формы, не склонные к образованию горячих трещин.

1.4. ДУГОВАЯ СВАРКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Особенности способа. Для получения качественных соединений при дуговой сварке необходима защита зоны дуги и расплавленного металла от вредного воздействия воздуха. При сварке в среде защитных газов для защиты зоны дуги и расплавленного металла используется газ, подаваемый струей с помощью горелки.

Сварку в среде защитных газов можно выполнять неплавящимся или плавящимся электродом (рис. 1.23). При сварке неплавя-

щимся электродом дуга горит между электродом и свариваемой деталью. В процессе сварки электрод не расплавляется и не попадает в шов. Дуга, перемещаясь вдоль свариваемых кромок, оплавляет их. По мере удаления дуги расплавленный металл затвердевает, образуя шов, соединяющий кромки детали.

При сварке плавящимся электродом дуга горит между электродной проволокой, непрерывно подаваемой в дугу, и свариваемой деталью. Дуга расплавляет проволоку и свариваемые кромки, в результате чего образуется общая сварочная ванна. По мере перемещения дуги сварочная ванна затвердевает, формируя шов, соединяющий кромки.

В развитии традиционных способов сварки в среде защитных газов разработан ряд новых способов: импульсно-дуговая, вибро-дуговая. Систематизация классификационных признаков способов ручной дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов приведена на рис. 1.24.

Основными параметрами режима ручной аргодуговой сварки неплавящимся электродом являются ток дуги, скорость сварки и расход защитного газа; при сварке плавящимся электродом — ток дуги, расход защитного газа, скорость сварки и скорость подачи электродной проволоки.

К достоинствам дуговой сварки в среде защитных газов относятся высокая концентрации энергии дуги, обеспечивающая минимальную зону термического влияния и небольшие деформации сварного узла; высокая производительность процесса; эффективная защита расплавленного металла, особенно при использовании инертных газов в качестве защитной среды; отсутствие необходимости применения флюсов или обмазок; возможность сварки в разных пространственных положениях.

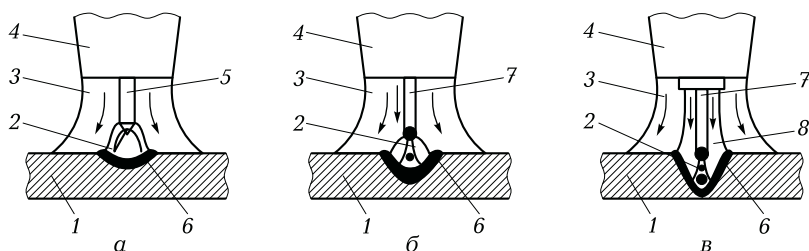


Рис. 1.23. Схемы сварки в среде защитных газов:

а — неплавящимся электродом; *б* — плавящимся электродом; *в* — плавящимся электродом в двух потоках газа; 1 — деталь; 2 — дуга; 3 — наружный поток защитного газа; 4 — сопло; 5 — неплавящийся электрод; 6 — сварочная ванна; 7 — электродная проволока; 8 — внутренний поток защитного газа



Рис. 1.24. Систематизация классификационных признаков способов ручной дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов

Используемые материалы. При сварке в среде защитных газов используются инертные и активные газы, неплавящиеся электроды и сварочная проволока.

Инертные газы (аргон, гелий и их смеси) при сварке не взаимодействуют с металлом свариваемых деталей.

Аргон — это бесцветный неядовитый газ, почти в полтора раза тяжелее воздуха. С большинством элементов аргон не образует химических соединений. Аргон не растворяется в металлах ни в жидком, ни в твердом состоянии.

Аргон отпускается, транспортируется и хранится в стальных баллонах в газообразном состоянии при давлении 15 МПа или в сжиженном переохлажденном состоянии ($T < -186^\circ\text{C}$, $p = 0,1 \dots 1$ МПа).

Для сварки плавящимся электродом конструкций из углеродистых легированных сталей используется аргон, содержащий 1...5% кислорода.

Гелий — это бесцветный неядовитый газ без запаха и вкуса, значительно легче воздуха и аргона, хорошо диффундирует через твердые тела. Гелий производится в основном путем сжижения природных газов. Для сварки используется гелий высокой чистоты и гелий сорта А.

Гелий транспортируется и хранится в стальных баллонах в газообразном состоянии при давлении 15 МПа или в сжиженном состоянии при давлении не более 2 МПа. Гелий значительно дороже аргона, поэтому применяется в основном при сварке химически чистых и активных металлов и сплавов, а также сплавов на основе алюминия и магния.

На практике иногда применяются смеси аргона и гелия (50 % Ar + 50 % He и 40 % Ar + 60 % He), которые производятся путем смешивания двух газов, отбираемых из двух отдельных баллонов.

Активные газы (углекислый газ и его смеси с кислородом и азотом) при сварке взаимодействуют с металлом свариваемых деталей.

Азот — это бесцветный неядовитый газ. В сварочном производстве азот не находит широкого применения. Он используется для сварки меди и ее сплавов, по отношению к которым является инертным газом. По отношению к большинству других металлов азот является активным газом, часто вредным, поэтому его стараются избегать.

Неплавящиеся электроды чаще всего представляют собой стержни из вольфрама. Вольфрамовые электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949—80 и могут содержать активизирующие добавки оксида лантана (ЭВЛ), иттрия (ЭВИ), диоксида тория (ЭВТ). Эти добавки облегчают зажигание, поддерживают горение дуги и повышают эмиссионную стойкость электрода. Чаще всего используются электроды ЭВЛ и ЭВИ диаметром 0,5... 10 мм, выдерживающие максимальную токовую нагрузку. Из-за окисления вольфрамовых электродов и их быстрого разрушения не допускается использование для защиты газов, содержащих кислород.

Сварочная проволока может быть изготовлена из стали, алюминия и его сплавов, меди и ее сплавов. При сварке стальных конструкций в основном используется холоднотянутая стальная сварочная проволока (по ГОСТ 2246—70, предусматривающему изготовление проволоки 75 марок). В соответствии с ГОСТ 2246—70 в зависимости от уровня легирования сварочная проволока подразделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную.

Изготавливается низкоуглеродистая проволока 6 марок: Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-10ГА и Св-10Г2.

В условном обозначении сварочной проволоки указываются диаметр и марка проволоки; индексы, характеризующие способ выплавки стали, из которой она изготовлена; назначение проволоки и вид ее поверхности; номер ГОСТа.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без дефектов (трещин, расслоений, плен, закатов, раковин, забоин) и загрязнений (окалины, ржавчины, масла). Допускается наличие на поверхности проволоки рисок (в том числе затянутых), царапин, местной рябизны и отдельных вмятин. Глубина указанных дефектов не должна превышать предельного отклонения по диаметру проволоки.

При сварке плавлением алюминия и его сплавов в основном используется тянутая и прессованная сварочная проволока из алюминия и алюминиевых сплавов (ГОСТ 7871—75, предусматривающий изготовление проволоки 14 марок).

Овальность проволоки не должна превышать предельных отклонений по диаметру. Поверхность проволоки диаметром 4 мм и менее подвергается химической обработке. После обработки проволока должна иметь блестящую поверхность с шероховатостью $Ra < 2,5$ мкм (по ГОСТ 2789—73).

При сварке конструкций из меди и ее сплавов используются сварочная проволока и прутки из меди и сплавов на ее основе (по ГОСТ 16130—72).

Технология сварки неплавящимся электродом. Дуговой сваркой неплавящимся электродом можно сваривать соединения разных типов в разных пространственных положениях. Применение этого способа целесообразно для сварки листов толщиной до 5...6 мм и даже более толстых. Сварка выполняется без присадочного металла (когда шов формируется за счет расплавления кромок) и с присадочным металлом, подаваемым в зону дуги в виде сварочной проволоки. Как правило, сварку ведут при напряжении дуги 22...34 В и длине дуги 1,5...3 мм. Вылет конца электрода из сопла не должен превышать 3...5 мм, а при сварке угловых швов и стыковых швов с разделкой — 5...7 мм.

Ручная сварка листов толщиной до 10 мм выполняется левым способом. Поток защитного газа должен надежно охватывать всю область сварочной ванны и разогретую часть присадочной проволоки (рис. 1.25). При сварке листов меньшей толщины угол между горелкой и кромкой следует уменьшить.

Сварка листов толщиной свыше 10 мм выполняется правым способом, а угол между горелкой и кромкой должен быть близким к 90°. Такое положение горелки относительно свариваемых кромок

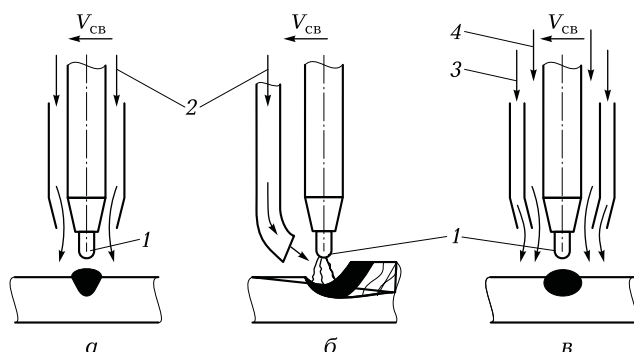


Рис. 1.25. Схемы центрального (а), бокового (б) и двух концентрических (в) газовых потоков в зоне сварки при сварке левым способом:

1 — электрод; 2 — защитный газ; 3, 4 — наружный и внутренний потоки защитного газа

рекомендуется и при сварке угловых соединений. Проволока вводится не в столб дуги, а сбоку. При сварке тонких листов металла проволокой выполняют возвратно-поступательные движения. При выполнении многослойных швов отдельные валики рекомендуется укладывать не на всю ширину разделки.

При сварке неплавящимся электродом расплавленный металл не переносится через дуговой промежуток, что облегчает условия горения дуги и повышает стабильность горения.

Присадочный металл по мере необходимости подается в головную часть сварочной ванны. Сварщик вручную контролирует перемещение сварочной горелки и подачу присадочной проволоки. В отличие от сварки плавящимся электродом скорость плавления присадочного металла не связана жесткой зависимостью с силой сварочного тока. Количество присадочного металла, подаваемого в ванну, определяется из условия обеспечения требуемой доли участия присадочного металла в образовании шва. При сварке стыковых соединений без разделки кромок присадочный металл необходим в основном для создания выпуклости шва.

Основные недостатки сварки неплавящимся электродом — низкая производительность, необходимость большой практики и высокой квалификации сварщика, необходимость применения дополнительных мер защиты от световой и тепловой радиации дуги.

Сварка неплавящимся электродом производится на прямой полярности («минус» на электроде). При установившейся дуге поток отрицательно заряженных электронов движется от отрицательного

электрода (горелки) к положительному (свариваемой детали), а поток положительно заряженных ионов — к электроду. При сварке на обратной полярности примерно 70 % теплоты сконцентрировано на аноде, и значительная часть этой теплоты передается в зону сварки.

Прямая полярность позволяет получить узкую сконцентрированную дугу, обеспечивающую глубокое проплавление и высокую скорость сварки. Электрод, получающий меньшую часть тепловой энергии дуги, будет иметь меньшую температуру, чем при сварке на переменном токе или при сварке на обратной полярности. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить диаметр неплавящегося электрода и снизить расход защитного газа.

При сварке на обратной полярности поток электронов также движется от отрицательного электрода к положительному, но в данном случае от свариваемой детали к электроду. Следовательно, больше теплоты сконцентрировано в дуге около неплавящегося электрода. Поскольку электрод получает значительно больше теплоты при сварке на обратной полярности, чем на прямой, для предотвращения перегрева электрода приходится использовать электроды увеличенного диаметра и уменьшать силу сварочного тока. Свариваемая деталь при сварке на обратной полярности получает меньше теплоты, в результате глубина проплавления уменьшается.

Некоторые цветные металлы (например, алюминий и магний) быстро образуют на поверхности оксидную пленку. Прежде чем сваривать алюминий, необходимо удалить оксидную пленку, температура плавления которой значительно выше температуры плавления основного металла. Оксидную пленку можно удалять механически (например, щетками) или химически (травлением), но, как только пленка удалена, металл снова начинает окисляться, затрудняя сварку.

Оксидную пленку с поверхности металла во время сварки на обратной полярности может удалять сама дуга. Положительно заряженные ионы, которые при сварке на прямой полярности перемещались от основного металла свариваемой детали к электроду, теперь перемещаются от электрода к детали. Ударяясь с достаточной силой о поверхность детали, они дробят и расщепляют хрупкую оксидную пленку, тем самым очищая поверхности.

Дуга обратной полярности обладает важным технологическим свойством: при ее воздействии происходит очистка поверхности свариваемых кромок и удаляются поверхностные оксиды. Процесс удаления поверхностных оксидов называется катодным распылением (катодной очисткой). Указанное свойство используется при сварке на переменном токе деталей из алюминия, магния, берил-

лия и их сплавов, склонных к образованию на поверхности прочных оксидных пленок. Удаление пленки происходит в полупериод с обратной полярностью сварочного тока, когда свариваемая деталь является катодом. Таким образом, при сварке неплавящимся электродом на переменном токе реализуются достоинства дуги прямой и обратной полярности и обеспечиваются устойчивость электрода и разрушение поверхностных оксидов на свариваемой детали.

Основным условием для возбуждения и горения дуги является ионизация газа в дуговом промежутке. Ионизацией называется процесс, при котором из нейтральных атомов и молекул образуются положительные и отрицательные ионы. Ионизированный газ — хороший проводник электрического тока.

Ионизация произойдет, если приложить к электродам высокое напряжение. Тогда имеющиеся в газе свободные электроны будут разгоняться электрическим полем и, получив большие энергии, смогут разбить нейтральные атомы и молекулы на ионы.

При сварке в среде защитного газа теплоты, выделяемой дугой, достаточно для ионизации газа. Однако при сварке на переменном синусоидальном токе при переходе тока через нулевое значение теплоты, выделяемой дугой, становится недостаточно, и она гаснет.

Для устранения гашения дуги при сварке на переменном синусоидальном токе и для облегчения возбуждения дуги без короткого замыкания электрода на свариваемую деталь применяются осцилляторы. Осциллятор представляет собой источник высокого напряжения и высокой частоты, способный вызывать искровой разряд между электродом и свариваемой деталью. Для пробоя межэлектродного промежутка длиной 1 мм в воздухе необходимо напряжение примерно 1...3 кВ, в аргоне напряжение пробоя может быть ниже.

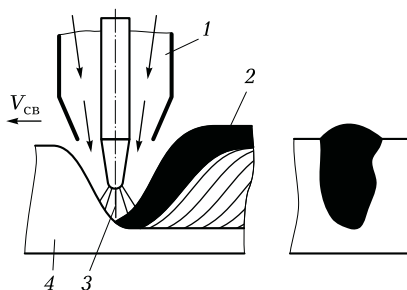


Рис. 1.26. Сварка неплавящимся электродом погруженной дугой:

1 — поток защитного газа; 2 — сварочная ванна; 3 — дуга; 4 — свариваемая деталь

Разновидности сварки неплавящимся электродом. Одной из разновидностей сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов является сварка погруженной дугой (рис. 1.26), при которой используется электрод повышенного диаметра и повышенный сварочный ток. Соединение собирается встык без разделки кромок и без зазора. При увеличении подачи защитного газа 1

через сопло до 40...50 л/мин дуга обжимается газом, что повышает ее температуру. Как и в плазматронах, проходящий через дугу газ, нагреваясь, увеличивает свой объем и приобретает свойства плазмы. Давление защитного газа и дуги 3, вытесняя расплавленный металл из-под дуги, способствует ее углублению в основной металл 4.

Таким образом, дуга горит в полости, образовавшейся в расплавленном металле. Это позволяет опустить электрод так, чтобы дуга горела ниже поверхности металла (погруженная в металл дуга). При кристаллизации сварочная ванна образует шов. Этим способом можно сваривать конструкции из титана, алюминия, высоколегированных сталей и других металлов толщиной до 36 мм с двух сторон (чем меньше плотность металла свариваемой конструкции, тем больше толщина). При этом получается шов специфической бочкообразной формы, обусловленной тем, что дуга горит ниже верхней плоскости металла.

Сварку погруженной дугой можно выполнять и в вертикальном положении на подъем. В этом случае расплавленный металл сварочной ванны, стекая вниз, удерживается кристаллизатором (медным кокилем, охлаждаемым водой), который принудительно формирует шов. Возможна сварка с одной стороны с неполным проплавлением или за два прохода с двух сторон с неполным проплавлением в каждый проход. При сварке погруженной дугой применяются входные и выводные планки для вывода дефектных участков шва: начального (неполный провар) и конечного (усадочная раковина).

Другой разновидностью сварки неплавящимся электродом является сварка полым электродом (катодом) в вакууме (рис. 1.27).

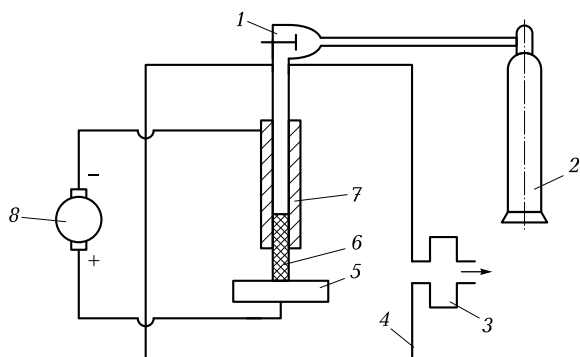


Рис. 1.27. Сварка полым неплавящимся электродом (катодом) в вакууме: 1 — дозирующее устройство; 2 — баллон с инертным газом; 3 — насос; 4 — вакуумная камера; 5 — свариваемая деталь; 6 — дуга; 7 — полый электрод; 8 — источник тока

Возбуждение и поддержание дуги в вакууме достаточно затруднительно, так как тлеющий разряд переходит на стенки камеры. Подача дозируемого количества газа в полость электрода стабилизирует катодное пятно на внутренней поверхности электрода. Перемещение катода по внутренней полости вызывает разогрев электрода до яркого свечения. При силе тока свыше 50 А дуга представляет собой голубоватый разряд цилиндрической формы на всей длине дуги.

Газ, подаваемый в полость электрода, ионизируясь, приобретает свойства плазмы. Количество газа, подаваемое в полость электрода, должно обеспечивать давление газа в камере не выше 50 мм рт. ст. Применение данного способа сварки способствует удалению газов из расплавленного металла и уменьшению утара легирующих элементов. Этим способом можно сваривать конструкции из разных металлов и сплавов толщиной до 15 мм.

Для сварки тонких металлических листов применяется импульсная дуга. Этот способ называется импульсной аргодуговой сваркой (рис. 1.28). Основной металл расплавляется дугой, горячей периодически отдельными импульсами постоянного тока с определенными интервалами во времени. При большом перерыве в горении дуги ($t_{\text{п}}$) снижается ионизация газа в дуговом промежутке, что затрудняет повторное возбуждение дуги. Для устранения этого недостатка постоянно поддерживается вторая (обычно маломощная) дежурная дуга от самостоятельного источника питания. На эту дугу и накладывается основная дуга (импульсная). Дежурная дуга, постоянно поддерживая термоэлектронную эмиссию с электрода, обеспечивает стабильное возникновение основной сварочной дуги.

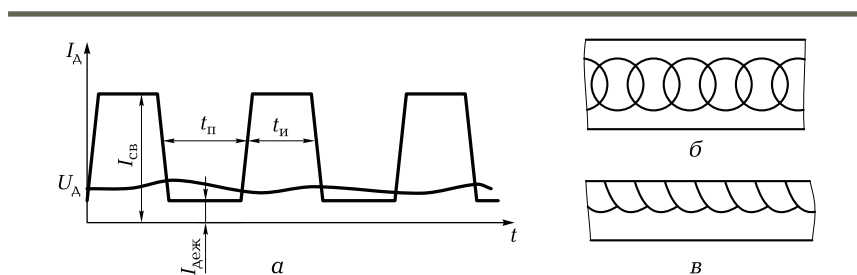
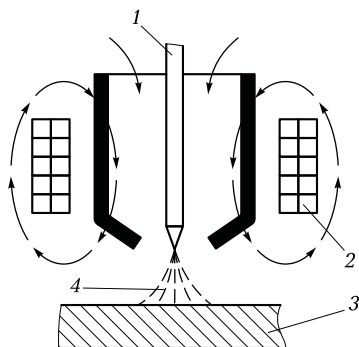


Рис. 1.28. Изменение силы тока $I_{\text{д}}$ дуги и напряжения $U_{\text{д}}$ при импульсной аргодуговой сварке (а) и форма шва в плоскости свариваемого листа (б) и продольном сечении листа (в):

$I_{\text{д}}$ — сила тока дуги; $I_{\text{св}}$ — сила тока дуги в импульсе; $I_{\text{деж}}$ — сила тока дуги в дежурном режиме (пауза); $t_{\text{и}}$ — длительность импульса; $t_{\text{п}}$ — длительность паузы; $U_{\text{д}}$ — напряжение дуги

Рис. 1.29. Схема дуговой сварки с отклонением или перемещением под действием внешнего магнитного поля непрерывно горящей дуги:

1 — электрод; 2 — катушка электромагнита; 3 — свариваемая деталь; 4 — дуга



Шов в этом случае состоит из отдельных перекрывающихся друг друга точек. Величина перекрытия зависит от толщины свариваемой детали, силы сварочного тока и тока дежурной дуги, скорости сварки и т. д. С увеличением силы тока и длительности его импульса ширина шва и глубина проплавления увеличиваются. Размеры шва в большей степени зависят от силы тока, чем от длительности его импульса. Благоприятная форма отдельных точек, близкая к кругу, уменьшает возможность вытекания расплавленного металла из сварочной ванны (прожога). Поэтому сварку легко выполнять на весу без подкладок, причем при хорошем качестве во всех пространственных положениях.

На практике используется внешнее магнитное поле для отклонения или перемещения непрерывно горящей дуги (рис. 1.29). Внешнее переменное или постоянное магнитное поле, параллельное направлению сварки или перпендикулярное ему, создается П-образными электромагнитами. При этом дугу можно отклонить в любую сторону относительно направления сварки. При отклонении дуги в сторону направления сварки (магнитное поле также параллельно направлению сварки) наблюдается такой же эффект, как при сварке с наклоном электрода углом вперед. В этом случае уменьшается глубина проплавления. При отклонении дуги в обратном направлении наблюдается увеличение глубины проплавления, как при сварке с наклоном электрода углом назад.

При переменном внешнем магнитном поле дуга колеблется с его частотой. В результате изменяются условия ввода теплоты в свариваемую конструкцию, в частности, ее распределение по поверхности. При колебании дуги поперек направления сварки увеличивается ширина шва и уменьшается глубина проплавления, что позволяет сваривать конструкции из тонколистового металла. Этот

способ удобно использовать для сварки конструкций из разнородных металлов.

Колебания, сообщаемые расплавленному металлу сварочной ванны, изменяют характер его кристаллизации, что способствует измельчению зерна металла шва и улучшению его свойств. Данный способ сварки применяется при изготовлении конструкций из металлов (алюминия, меди, титана и их сплавов), склонных к образованию крупнозернистой структуры в шве. Накоплен положительный опыт использования рассмотренного способа и при сварке конструкций из высокопрочных сталей и сплавов.

Неплавящиеся электроды целесообразно применять при сварке металлических листов толщиной 0,1...6 мм. Однако их можно использовать и при большей толщине листа. Такая сварка выполняется без присадки (шов формируется за счет расплавления кромок) и с дополнительным присадочным металлом, предварительно уложенным в разделку или подаваемым в зону дуги в виде присадочной проволоки. Угловые и стыковые швы во всех пространственных положениях выполняются вручную, полуавтоматически и автоматически.

Загрязнение рабочего конца электрода понижает его стойкость (образуется сплав вольфрама с более низкой температурой плавления) и ухудшает качество шва. Поэтому дугу следует возбуждать без прикосновения к основному металлу или присадочной проволоке с помощью осциллятора или путем замыкания дугового промежутка угольным электродом. При правильном выборе силы сварочного тока рабочий конец электрода расходуется незначительно и долго сохраняет форму заточки.

Качество шва в большей степени определяется надежностью отгеснения воздуха от зоны сварки. Необходимый расход защитного газа устанавливается в зависимости от толщины свариваемой детали и состава ее металла, типа сварного соединения и скорости сварки. Поток защитного газа при сварке должен надежно охватывать всю область сварочной ванны, разогретую часть присадочного прутка и электрод. При повышенных скоростях сварки поток защитного газа может отгесняться воздухом. В этих случаях следует увеличивать расход защитного газа.

При сварке конструкций из активных металлов необходимо не только получить хороший провар в корне шва, но и обеспечить защиту от воздуха обратной его стороны (рис. 1.30). Это достигается использованием медных или других подкладок с канавками, в которые подается защитный инертный газ.

При соединении встык листов толщиной до 10 мм ручную сварку ведут справа налево (левым способом). При сварке более тонких

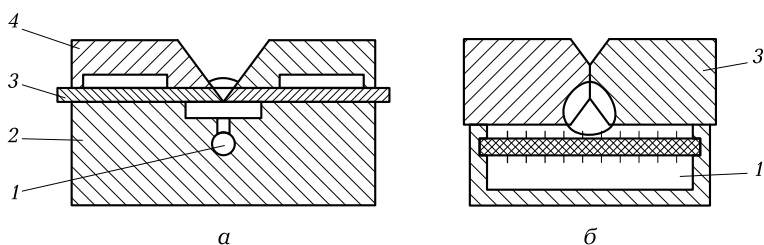


Рис. 1.30. Подкладки для защиты от воздуха обратной стороны шва при односторонней [а] и двухсторонней [б] сварке конструкций из активных металлов:

1 — канал для подачи защитного газа; 2 — медная подкладка; 3 — свариваемая деталь; 4 — зажимное приспособление

листов между горелкой и поверхностью листа устанавливается угол 60° . При сварке более толстых листов применяется правый способ; между горелкой и поверхности листа, как и при сварке угловых соединений, устанавливается угол 90° .

При ручной сварке тонких листов присадочный пруток вводят не в столб дуги, а несколько сбоку, возвратно-поступательными движениями; при сварке более толстых листов — поступательно-поперечными перемещениями. При выполнении многослойных швов отдельные валики рекомендуется укладывать не на всю ширину разделки.

При автоматической и полуавтоматической сварке электрод следует располагать перпендикулярно поверхности листа. Угол между поверхностью листа и присадочной проволокой (обычно диаметром 2... 4 мм) должен быть близким к 90° . В большинстве случаев направление сварки выбирается таким, чтобы присадочный пруток находился впереди дуги (подавался в головную часть сварочной ванны).

Однако при сварке по криволинейному контуру такая схема подачи присадочной проволоки неудобна из-за сложности образования шва на разворотах. В этом случае применяется вертикальная подача присадочной проволоки в сварочную ванну. При этом криволинейные участки шва свариваются без разворота сварочной горелки. В процессе сварки необходимо вращать неплавящийся электрод вместе с электрододержателем вокруг присадочной проволоки (рис. 1.31).

В настоящее время широко применяется сварка толстых листов неплавящимися сканирующими электродами по щелевому зазору (рис. 1.32). За счет сокращения количества наплавляемого металла

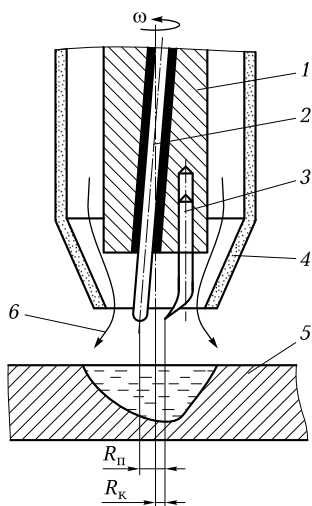


Рис. 1.31. Схема автоматической сварки вращающимся неплавящимся электродом:

1 — электрододержатель; 2 — присадочная проволока; 3 — неплавящийся электрод; 4 — сопло; 5 — свариваемая деталь; 6 — поток аргона; $R_п$ — радиус вращения присадочной проволоки; $R_к$ — радиус вращения рабочего конца электрода; ω — направление вращения электрода

значительно повышается производительность сварки. Однако при этом возможно неполное проплавление разделки кромки, что приводит к образованию несплавления в шве. В этом случае можно использовать один или два наплавляющихся электрода с отогнутым концом, поворачивающихся в зазоре. Дугу следует обрывать постепенным ее удлинением, а при автоматической сварке — уменьше-

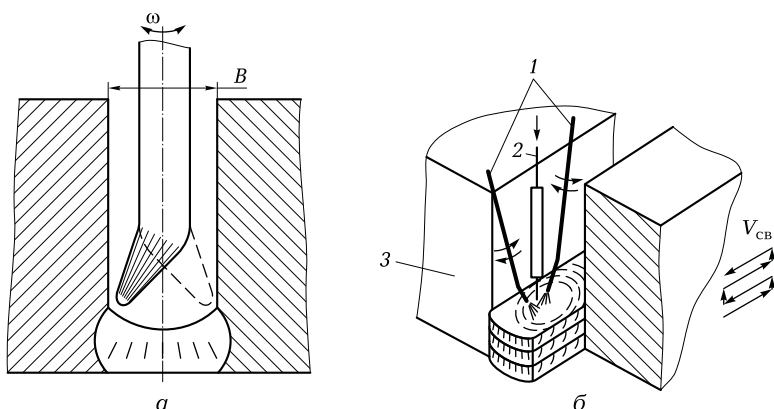


Рис. 1.32. Схема сварки одним (а) и двумя (б) неплавящимися сканирующими электродами по щелевому зазору:

1 — электроды; 2 — присадочная проволока; 3 — свариваемая деталь; ω — направление вращения электрода; B — ширина разделки кромки

нием силы сварочного тока. Для предупреждения окисления электрода и защиты расплавленного металла в кратере подачу защитного газа прекращают через 5... 10 с после обрыва дуги. Для освобождения шлангов от воздуха защитный газ включают за 15... 20 с до возбуждения дуги.

Технология сварки плавящимся электродом. При сварке плавящимся электродом шов образуется за счет проплавления основного и расплавления дополнительного металла (электродной проволоки). Форма и размеры шва зависят не только от скорости сварки, пространственного положения электрода и свариваемой детали, но и от характера расплавления и переноса электродного металла в сварочную ванну.

Характер расплавления электрода и переноса электродного металла в сварочную ванну определяется в основном материалом электрода, составом защитного газа, плотностью сварочного тока. При традиционном способе сварки плавящимся электродом можно выделить три основные формы расплавления электрода и переноса электродного металла в сварочную ванну (рис. 1.33): с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка, капельный и струйный.

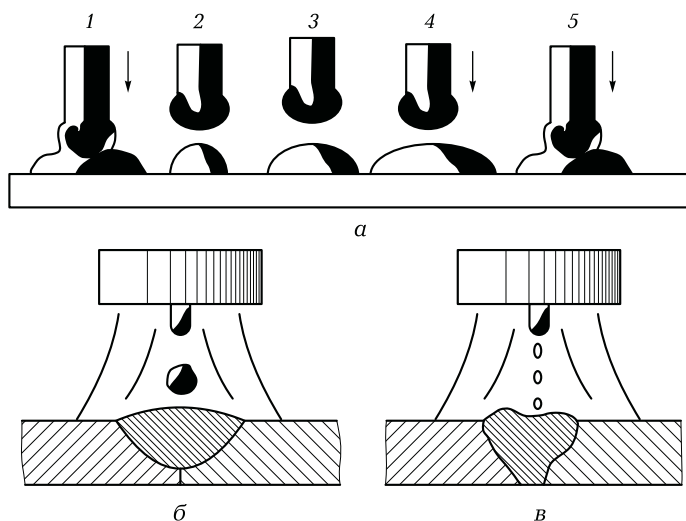


Рис. 1.33. Основные формы расплавления электрода и переноса электродного металла в сварочную ванну:

а — с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка; *б* — капельный; *в* — струйный; 1—5 — стадии процесса переноса электродного металла при периодических коротких замыканиях дугового промежутка

Сварка с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка выполняется электродными проволоками диаметром 0,5... 1,6 мм при короткой дуге с напряжением 15... 22 В. После очередного короткого замыкания дугового промежутка (на стадиях 1 и 2) силой поверхностного натяжения расплавленный металл на торце электрода стягивается в каплю; длина и напряжение дуги становятся максимальными. На всех стадиях этого процесса скорость подачи электродной проволоки постоянна, а скорость ее плавления изменяется (например, на стадиях 3 и 4 она становится меньше скорости подачи). В результате торец электрода с каплей приближается к сварочной ванне (длина и напряжение дуги уменьшаются) до короткого замыкания (стадия 5). При коротком замыкании дугового промежутка резко возрастает сила сварочного тока и увеличивается сжимающее действие электромагнитных сил, под совместным влиянием которых разрывается перемычка жидкого металла между электродом и свариваемой деталью. Во время короткого замыкания дугового промежутка капля расплавленного электродного металла переходит в сварочную ванну. Далее процесс повторяется.

Частота периодических замыканий дугового промежутка может изменяться в пределах 90... 450 в секунду. Для каждого диаметра электродной проволоки в зависимости от ее материала и используемого защитного газа существует свой диапазон силы сварочного тока, в котором возможен процесс сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. При оптимальных параметрах режима сварка возможна в разных пространственных положениях, а потери электродного металла на разбрызгивание не превышают 7%.

Увеличение силы сварочного тока и длины дуги ведет к изменению характера расплавления электрода и переноса электродного металла и приводит к переходу от сварки короткой дугой с короткими замыканиями дугового промежутка к сварке с редкими короткими замыканиями дугового промежутка (или без них). Электродный металл переносится в сварочную ванну нерегулярно, отдельными крупными каплями, хорошо различимыми невооруженным глазом. При этом ухудшаются технологические свойства дуги, затрудняется сварка в потолочном положении, а потери электродного металла на угар и разбрызгивание возрастают до 15%.

При достаточно высоких значениях (без импульсов) силы сварочного тока обратной полярности и горении дуги в среде инертных газов может наблюдаться перенос электродного металла очень мелкими каплями. Название «струйный перенос» связано с тем, что при его наблюдении невооруженным глазом создается впечатление, что расплавленный металл стекает в сварочную ванну с тор-

ца электрода непрерывной струей (см. рис. 1.33, в). Изменение характера переноса электродного металла с капельного на струйный происходит при увеличении силы сварочного тока до критического значения для данного диаметра электродной проволоки.

Изменение состава защитного газа также влияет на критическое значение силы тока (например, добавка в аргон до 5% кислорода снижает его). При сварке в среде углекислого газа без применения специальных мер струйный перенос электродного расплавленного металла в сварочную ванну невозможен.

При переходе к струйному переносу поток газов и металла от электрода в сторону сварочной ванны резко возрастает благодаря сжимающему действию электромагнитных сил. В результате под дугой уменьшается прослойка жидкого металла, в сварочной ванне появляется местное углубление. Шов приобретает специфическую форму из-за повышенной глубины проплавления по его оси. При струйном переносе дуга очень стабильна, колебаний сварочного тока и напряжений не наблюдается. Сварка возможна во всех пространственных положениях.

Улучшить технологические свойства дуги позволяет периодическое изменение ее силы тока и напряжения — импульсно-дуговая сварка (рис. 1.34). Под действием импульса тока происходит ускоренное плавление электрода, обеспечивающее формирование

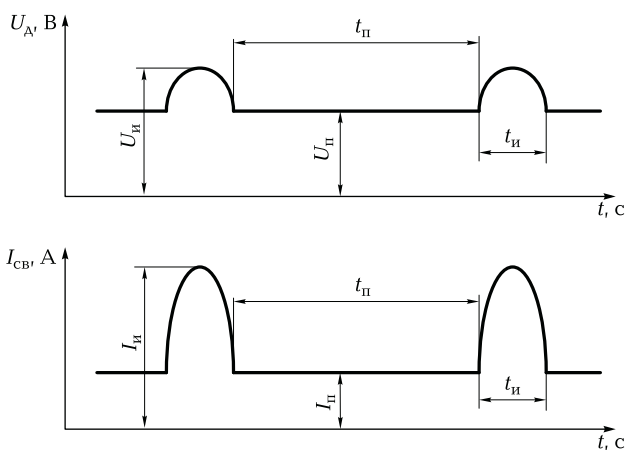


Рис. 1.34. Изменение силы тока и напряжения дуги при импульсно-дуговой сварке:

I_n , U_n — сила тока и напряжение основной дуги во время паузы; $I_{и}$, $U_{и}$ — сила тока и напряжение основной дуги во время импульса; t_n , $t_{и}$ — длительность паузы и импульса

капли на его конце. Резкое увеличение электродинамических сил сужает шейку капли и сбрасывает ее в направлении сварочной ванны (см. рис. 1.33, б).

Можно использовать одиночные импульсы или группу импульсов с одинаковыми или разными параметрами. В последнем случае первый (или первые) импульс ускоряет расплавление электрода, а последующие сбрасывают каплю расплавленного электродного металла в сварочную ванну (см. рис. 1.33, б).

Управлять характером переноса электродного металла можно путем воздействия на него импульсной подачей электродной проволоки. Импульсная подача позволяет расширить диапазон значений рабочих токов, в том числе при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка, частота которых может быть увеличена в 3—5 раз по сравнению с непрерывной подачей проволоки. Однако промышленное применение этого способа затруднено из-за отсутствия надежных механизмов импульсной подачи проволоки.

При сварке плавящимся электродом внешние магнитные поля отклоняют дугу. Эффект от использования внешнего магнитного поля наблюдается при сварке длинной дугой и особенно заметен при струйном переносе электродного металла. В этом случае расплавленный торец электрода колеблется синхронно с частотой внешнего магнитного поля. При поперечных колебаниях увеличивается ширина шва и уменьшается глубина проплавления. В результате образующийся шов не имеет повышенной глубины проплавления по своей оси.

Технологические характеристики дуги можно изменять применением центральной подачи защитного газа с высокой скоростью. Высокие скорости истечения газа при обычных расходах достигаются при использовании сопел с уменьшенным выходным отверстием. Обдувание дуги газом способствует уменьшению ее поверхности (сжатию). В результате повышается концентрация теплоты, вводимой в свариваемую деталь от дуги. Кинетическим давлением потока газа расплавленный металл оттесняется из-под дуги, и дуга углубляется в деталь. В результате глубина проплавления увеличивается в 1,5—2 раза, но при этом повышается и возможность образования дефектов в швах.

В отечественной и зарубежной практике применяется сварка с узкощелевой разделкой кромок (рис. 1.35), когда деталь толщиной до 200 мм без скоса кромок собирается с зазором между ними всего 6...12 мм. Сварка выполняется на автоматах. При сварке стальных деталей плавящимся электродом способом узкощелевой разделки кромок для защиты лучше использовать смесь из 75...80 % аргона

и 20...25% углекислого газа. Для сварки конструкций из алюминия и его сплавов применяется смесь аргона и гелия. Разделку заполняют путем наложения валиков одного сечения. Описанный метод характеризуется уменьшенной протяженностью зоны термического влияния и равномерностью мелкокристаллической структуры швов.

При этом способе сварки форма и размеры шва зависят от основных параметров режима сварки так же, как при сварке под слоем флюса. Для сварки используются тонкие электродные проволоки (диаметром до 3 мм), поэтому провар шва получается узким. Форма шва и условия кристаллизации металла сварочной ванны изменяется за счет колебаний электрода. В настоящее время накоплен опыт применения для сварки в среде углекислого газа электродных проволок диаметром 3...5 мм. В этом случае сила сварочного тока достигает 2000 А, за счет чего значительно повышается производительность сварки. Однако при использовании подобных форсированных режимов ухудшается качество стыковых швов, в них образуются подрезы.

Расстояние от сопла горелки до поверхности свариваемой детали обычно выдерживается в пределах 8...15 мм. Токоподводящий мундштук должен находиться на уровне краев сопла горелки или на 3 мм ниже этого уровня. При выполнении угловых и стыковых швов с глубокой разделкой допускается выступание токоподводящего мундштука из сопла горелки на 5...10 мм.

При сварке тонких листов электрод необходимо отклонить от вертикали на 20...30° в сторону направления сварки. При сварке угловых швов в соединениях с вертикальной стенкой горелку следует дополнительно отклонить от вертикальной стенки на 30...45°. Вертикальные швы при сварке тонких листов обычно выполняются «на спуск» (для лучшего удержания расплавленного металла от стекания электрод должен находиться под углом назад). Сварка «на подъем» обеспечивает глубокий провар кромок.

При сварке горизонтальных швов электрод следует располагать на нижней части кромок и перемещать его с поперечными колеба-

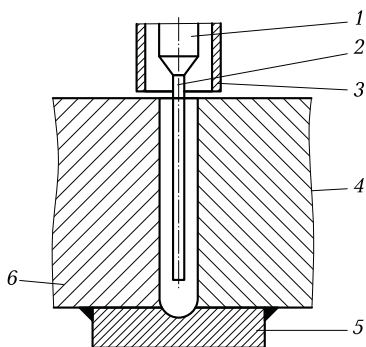


Рис. 1.35. Схема импульсно-дуговой сварки с узкощелевой разделкой кромок:

1 — токоподводящий мундштук; 2 — электродная проволока; 3 — сопло горелки; 4, 6 — свариваемые детали; 5 — остающаяся подкладка из основного материала

ниями. При сварке потолочных швов электрод следует располагать вертикально или с наклоном углом назад и перемещать его с поперечными колебаниями.

1.5. ДУГОВАЯ СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Конструкции порошковой проволоки. Порошковая проволока представляет собой непрерывный электрод, состоящий из металлической оболочки и порошкового сердечника (рис. 1.36). Промышленностью выпускается порошковая проволока двух типов: газозащитная (для сварки в среде углекислого газа) и самозащитная (для сварки без дополнительной защиты). Конструкция порошковой проволоки определяет некоторые особенности ее расплавления дугой. Сердечник проволоки на 50...70% состоит из неметаллических материалов, и его электросопротивление в сотни раз больше электросопротивления металлической оболочки. Поэтому практически

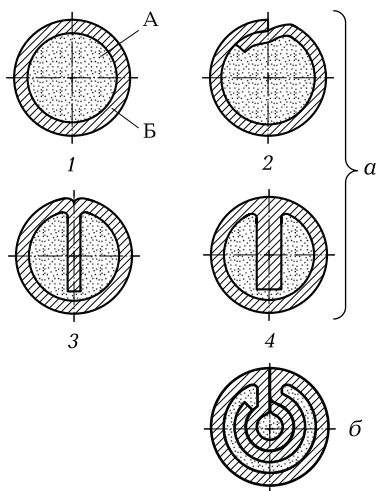


Рис. 1.36. Конструкции порошковой проволоки:

а — однослойная (1 — трубчатая; 2 — с нахлестом; 3, 4 — с загибом оболочки); *б* — двухслойная; А — порошковый сердечник; Б — стальная оболочка

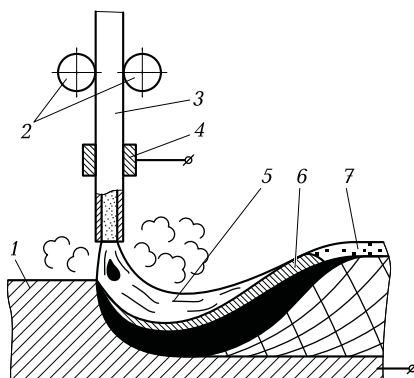


Рис. 1.37. Схема дуговой сварки порошковой проволокой:

1 — свариваемая деталь; 2 — подающие ролики; 3 — порошковая проволока; 4 — скользящий токоподвод; 5 — дуга; 6 — расплавленный шлак; 7 — затвердевший шлак

весь сварочный ток проходит через металлическую оболочку, расплавляя ее. Плавление же сердечника, расположенного внутри металлической оболочки, происходит в основном за счет теплоизлучения дуги и теплопередачи от расплавляющегося металла оболочки. Этим обусловлена способность сердечника выступать из оболочки, касаться ванны жидкого металла или переходить в нее в частично не расплавленном состоянии. Это увеличивает засоренность шва неметаллическими включениями.

Технология сварки. Схема дуговой сварки порошковой проволокой приведена на рис. 1.37. Обычно порошковая проволока используется для сварки шланговыми полуавтоматами. Ввиду возможности наблюдения за образованием шва техника сварки стыковых и угловых швов в различных соединениях практически не отличается от техники их сварки в среде защитных газов плавящимся электродом. Однако образование на поверхности сварочной ванны шлака, затекающего при некоторых условиях в зазор между кромками в передней части сварочной ванны, затрудняет провар корня шва. При многослойной сварке поверхность предыдущих слоев следует тщательно зачищать от шлака.

Сварка порошковой проволокой имеет свои недостатки. Порошковая проволока трубчатой конструкции ввиду малой жесткости требует применения подающих механизмов с ограниченной силой сжатия проволоки в подающих роликах. При использовании проволоки диаметром 2,6 мм и более для устойчивого горения дуги необходимы повышенные сварочные токи. Этим обусловлено использование их для сварки только в нижнем и редко в вертикальном положении. Кроме того, образующаяся сварочная ванна увеличенного объема, покрытая расплавленным шлаком, не удерживается в вертикальном и потолочном положении силой поверхностного натяжения и давлением дуги.

Шлак на поверхности сварочной ванны замедляет кристаллизацию расплавленного металла и ухудшает условия образования шва в пространственных положениях, отличных от нижнего.

Существенный недостаток порошковых проволок, сдерживающий их широкое промышленное применение, — наличие пустот в проволоке, из-за чего повышается вероятность образования пор в швах. Нерасплавившиеся компоненты сердечника, переходя в сварочную ванну, способствуют появлению в расплавленном металле газообразной фазы. То же самое происходит из-за диссоциации мрамора, окисления и восстановления углерода при нагреве и плавлении ферромарганца в сочетании с мрамором. Эти факторы также приводят к появлению в швах внутренних и поверхностных пор.

Кроме того, в подобных условиях на возможность образования пор влияют режим сварки, наличие влаги, попавшей в наполнитель при хранении проволоки, а также следы смазки и ржавчины на металлической ленте, из которой изготавливается трубчатая оболочка проволоки.

Порошковая проволока используется и при сварке в среде углекислого газа. В этом случае вероятность образования в швах пор снижается. Для сварки порошковой проволокой используется постоянный ток прямой или обратной полярности от источников с жесткой и крутопадающей характеристикой.

1.6. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Особенности способа. Электрошлаковая сварка (ЭШС) широко применяется в промышленности для соединения деталей повышенной толщины из сталей, чугунов, меди, алюминия, титана и их сплавов. Одним из достоинств ЭШС является возможность сварки за один проход деталей практически любой толщины, что не требует удаления шлака и соответствующей настройки сварочной установки перед сваркой последующего прохода, как при других способах сварки. При этом сварка выполняется без снятия фасок на кромках. Для сварки можно использовать один или несколько проволочных электродов или электродов увеличенного сечения. При ЭШС достигается высокая производительность и экономичность процесса, которые тем выше, чем толще свариваемые элементы.

Способ не лишен и недостатков. Например, ЭШС технически возможна при толщине детали более 16 мм, но редко экономически выгодна при изготовлении конструкций из элементов толщиной более 40 мм. Способ позволяет сваривать только вертикальные швы. При сварке конструкций из некоторых металлов образование неблагоприятных структур в металле шва и околошовной зоны требует последующей термообработки, обеспечивающей необходимые свойства сварного соединения.

Технология сварки. Расплавленные электрической дугой флюсы образуют шлаки, которые являются проводниками электрического тока. Если конец электрода опустить в шлаковую ванну, то через шлак пойдет ток и будет выделяться теплота, нагревающая свариваемые кромки. На этом и основана электрошлаковая сварка (рис. 1.38). Электрод 1 и основной металл 2 связаны электрически через шлаковую ванну 6. Выделяющаяся в шлаковой ванне теплота

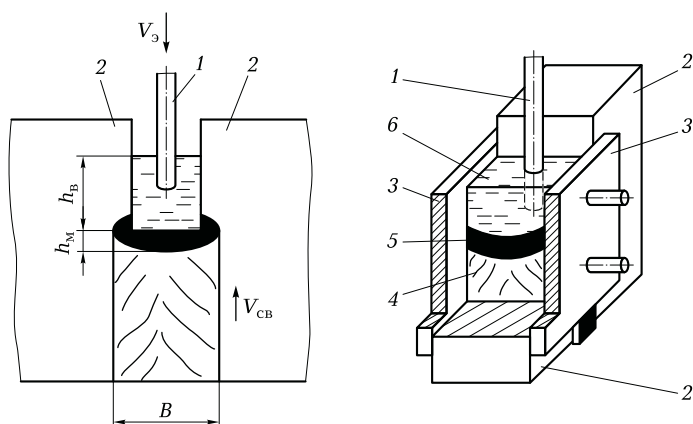


Рис. 1.38. Типовая схема электрошлаковой сварки:

1 — электрод; 2 — основной металл; 3 — медные водоохлаждаемые формирующие устройства; 4 — сварной шов; 5 — металлическая сварочная ванна; 6 — шлаковая ванна; $h_м$, $h_б$ — глубина металлической и шлаковой ванн; B — ширина шва

перегревает ее выше температуры плавления металла. В результате металл электрода и кромки основного металла оплавляются. Жидкий металл, имеющий более высокую плотность, чем шлак, стекает вниз и образует жидкую металлическую сварочную ванну 5. Шлаковая и металлическая ванны удерживаются от вытекания специальными медными водоохлаждаемыми формирующими устройствами 3. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны 5 металл образует сварной шов 4, поверхность которого покрыта тонкой шлаковой коркой, являющейся разделительным слоем между металлической ванной и поверхностью водоохлаждающего формирующего устройства. Это позволяет избежать непосредственного контакта жидкого металла ванны с поверхностью формирующего устройства и металл шва не насыщается медью. Шлаковая ванна защищает расплавленный металл от непосредственного взаимодействия с воздухом, обеспечивая окислительно-восстановительные реакции и рафинирование металла шва от неметаллических и газовых включений. Расход флюса при этом обычно не превышает 5% массы наплавленного металла. Ввиду малого количества шлака наплавленный металл легируется за счет присадочного материала. Шов образуется непрерывно благодаря постоянной подаче электрода со скоростью $V_э$, его расплавления и заполнения зазора между деталями жидким металлом, вытесняющим шлаковую ванну вверх со скоростью сварки $V_св$. На образование шва влияют такие

факторы, как тепловложение и связанный с ним термический цикл, определяемые параметрами режима сварки.

Полная тепловая мощность P , выделяющаяся в шлаковой ванне, определяется по формуле

$$P = UI, \quad (1.9)$$

где U — падение напряжения на вылете электрода в шлаковой ванне, В; I — сила сварочного тока, А.

До 23 % выделившейся теплоты расходуется на плавление электрода, до 60 % — на плавление основного металла и до 5 % — на плавление флюса. Потери теплоты на излучение, отвод в формирующие устройства и в основной металл составляют до 12 %. Если выделяемая теплота равна отдаваемой, то процесс будет протекать устойчиво. При избытке выделяемой теплоты шлаковая ванна перегревается, начинает кипеть и стабильность процесса нарушается. При недостатке теплоты ванна охлаждается, шлак теряет электропроводность и процесс сварки прекращается.

При установившемся тепловом балансе источник теплоты образует в свариваемой детали квазистационарное (не изменяющееся, движущееся вместе с зоной сварки) температурное поле, параметры которого зависят от мощности источника нагрева, скорости его перемещения и теплофизических свойств основного металла. Это поле создает при ЭШС довольно широкую зону термического влияния, ширина которой растет с увеличением мощности источника теплоты, а также с уменьшением скорости сварки.

Термический цикл ЭШС характеризуется медленным нагревом и охлаждением основного металла, что приводит к перегреву околошовной зоны и росту зерна металла шва, а это в конечном итоге определяет качество сварного соединения в целом. Например, при ЭШС конструкции из низкоуглеродистой стали при толщине деталей 200 мм свариваемые кромки основного металла прогреваются на глубину до 50 мм до температуры более 800 °С. Время пребывания отдельных участков околошовной зоны при такой температуре при средней скорости охлаждения 0,2...0,8 °С/с составляет 1...20 мин. Такой характер термического цикла, с одной стороны, снижает опасность появления трещин в околошовной зоне, а с другой стороны, приводит к росту зерна металла околошовной зоны и образованию в ней структур с низкой пластичностью. Особенно резко снижается ударная вязкость. Это основной недостаток ЭШС. Поэтому, как правило, после сварки возникает необходимость в высокотемпературной обработке готовой конструкции, особенно при соединении деталей большой толщины из легированных сталей.

При ЭШС нужно стремиться к уменьшению перегрева околошовной зоны и снижению роста зерна металла в ней. Этого можно добиться с помощью многослойной ЭШС, позволяющей снизить рост зерна металла в околошовной зоне за счет нагрева и охлаждения при наложении последующих слоев. Другой путь — местная последующая или сопутствующая термообработка сварного соединения дополнительным источником теплоты (газокислородным пламенем, высокочастотным индуктором) или искусственное охлаждение шва и околошовной зоны в процессе сварки. Отрицательное влияние перегрева не проявляется при сварке конструкций из сталей, малочувствительных к термическому влиянию при ЭШС.

Электрошлаковую сварку можно выполнить тремя способами: проволочными электродами, пластинчатыми электродами и плавящимся мундштуком (рис. 1.39). Каждый из способов имеет свои особенности и области применения.

Первый способ — сварка проволочными электродами диаметром 3...5 мм, подаваемыми в сварочный зазор специальными мундштуками с медными токосъемными наконечниками. Одновременно в шлаковую ванну подается до трех электродных проволок, что позволяет применять трехфазные источники питания. Поскольку выделение теплоты в шлаковой ванне происходит в основном в области электрода, максимальная толщина свариваемых элементов при использовании одной электродной проволоки обычно составляет 60 мм, трех — до 200 мм. Если мундштукам в зазоре сообщается

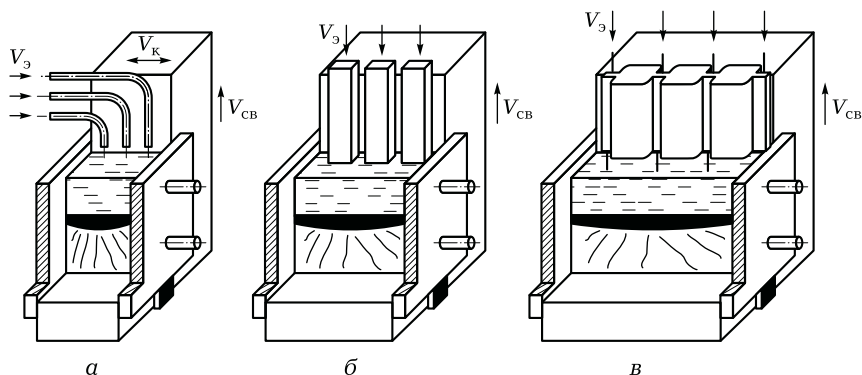


Рис. 1.39. Схемы электрошлаковой сварки проволочными (а) и пластинчатыми (б) электродами и плавящимся мундштуком (в):

$V_з$ — скорость подачи электрода; $V_к$ — скорость колебаний мундштука; $V_{св}$ — скорость сварки

возвратно-поступательное движение со скоростью V_k , то толщина свариваемых кромок может быть в 2,5 раза больше.

Второй способ — сварка пластинчатыми электродами большого сечения, подаваемыми в сварочный зазор. Электродами могут быть ленты толщиной 1... 1,2 мм или пластины толщиной 10... 12 мм и длиной, равной утроенной длине шва. Для сварки могут применяться одновременно не более трех электродов при использовании трехфазных источников тока. Одним пластинчатым электродом свариваются детали толщиной до 200 мм, а тремя электродами — до 800 мм. При этом скорость подачи электродов составляет 1,2... 3,5 м/ч.

Эти два способа успешно применяются при сварке деталей относительно небольшой толщины. При толщине свариваемых кромок более 800 мм особенно сильно сказываются недостатки таких способов сварки. Наличие подвижных мундштуков или пластин в сварочном зазоре может привести к коротким замыканиям их на свариваемые кромки, что нарушает стабильность процесса. Быстрый износ токосъемных трубок мундштуков усложняет и удорожает обслуживание сварочной установки и отрицательно влияет на стабильность процесса. Небольшая длина пластинчатых электродов ограничивает длину сварных швов.

Третий способ — сварка плавящимся мундштуком при неподвижном положении его в сварочном зазоре. Нехватка присадочного материала, необходимого для формирования шва, компенсируется за счет подачи электродных проволок диаметром 3 мм через каналы, выполненные из тонкостенных трубок или из сварочной проволоки, плотно навитой спиралью. Одновременно через один мундштук могут подаваться до шести электродных проволок. Одним мундштуком свариваются детали толщиной до 500 мм, двумя мундштуками — детали толщиной до 1 000 мм, тремя — до 1 500 мм и т. д. Этот способ, лишенный недостатков первых двух способов, расширяет возможности ЭШС. При использовании ЭШС плавящимися мундштуками можно соединять детали сложной формы сечения при любой их толщине.

Подготовка деталей к сварке. Кромки под ЭШС разделяются, как правило, под прямым углом. При сварке конструкций из металлопроката подготовка торцовых поверхностей кромок выполняется термическими способами разделительной резки; при сварке конструкций из литья, поковок, а также из легированных сталей — механической обработкой (токарной обработкой, фрезерованием или строганием). Иногда при ЭШС литых деталей кромки можно вообще не обрабатывать.

Величина зазора под ЭШС, образующейся между двумя свариваемыми кромками, является одним из важнейших технологических параметров. Различают расчетные и сборочные зазоры. Расчетный зазор регламентируется чертежом сварной конструкции, а сборочный зазор устанавливается технологическим процессом с учетом деформации при сварке.

Для компенсации деформации, связанной с угловым поворотом деталей при сварке, сборочный зазор делают клиновидным, расширяющимся кверху (рис. 1.40). Угол γ раскрытия стыка определяется нижним и верхним сборочными зазорами (b_v и b_n) и длиной стыка деталей H :

$$\gamma = (b_v - b_n) / H. \quad (1.10)$$

В зависимости от марки стали, способа ЭШС, параметров режима сварки и условий закрепления свариваемых деталей принимают $\gamma = 1 \dots 2^\circ$ (или $0,02 \dots 0,03$ рад).

Для соединения свариваемых деталей между собой при сборке вдоль стыка, через 500...1000 мм, привариваются П-образные скобы. Внизу, в начале стыка, устанавливается так называемый входной карман для разведения шлаковой ванны, а сверху стыка — выходной карман для вывода усадочной рыхлости, образующейся в конце шва. После сварки карманы срезают газовой резкой. При ЭШС однотипных деталей входной и выходной карманы должны быть медными водоохлаждаемыми.

Типы сварных соединений, выполняемых ЭШС, классифицируются по поперечным сечениям швов и форме их продольного сечения. Наиболее распространенным и простым типом является стыковое соединение, при сборке которого смещение кромок не должно превышать 0,5...1 мм на длине 200...250 мм. Угловые и тавровые соединения также применяются в конструкциях, выполняемых ЭШС.

Вид сварного шва определяется его продольным сечением. Различают

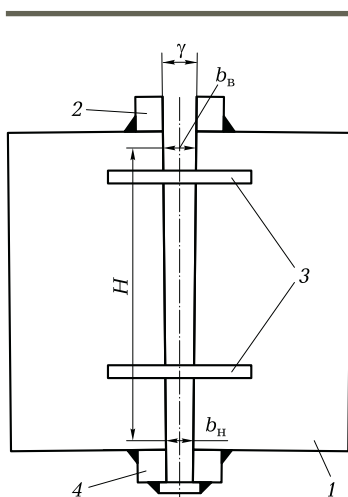


Рис. 1.40. Деталь, собранная под сварку:

1 — свариваемые элементы; 2 — выходной карман; 3 — сборочные скобы; 4 — входной карман; b_v , b_n — верхняя и нижняя ширина сборочного зазора; γ — угол раскрытия стыка; H — длина стыка деталей

швы прямолинейные, кольцевые и сложной формы. Прямолинейные швы применяются в сочетании со сварными соединениями всех типов, причем качественное сварное соединение может быть получено при отклонении оси шва от вертикали не более чем на $15 \dots 20^\circ$. Кольцевые швы выполняются обычно стыковыми. Техника ЭШС кольцевых швов более сложная, поэтому допуски на смещение кромок более жесткие. Наибольшая разность диаметров соединяемых деталей должна быть не более 1 мм, а смещение кромок $0,5 \dots 1$ мм. При сварке кольцевых швов цилиндрических конструкций большого диаметра с малой толщиной стенки, изготавливаемых из проката без механической обработки кромок, смещение последних допускается до 3 мм.

Наиболее трудная сварка швов сложной формы выполняется по профилю проектного сечения. В ряде случаев сечение необходимо дополнять до прямоугольной формы пластинами из проката.

Параметры режима сварки и их влияние на размеры металлической ванны и шва. Основные параметры режима ЭШС — сила сварочного тока, напряжение на электродах и скорость сварки. Изменением этих параметров можно влиять на размеры металлической ванны и шва. Размеры ванны оцениваются ее шириной e и глубиной h . Размеры шва (например, выпуклость) определяются размерами формирующих устройств.

Сила сварочного тока является главным параметром, за счет которого можно изменять глубину ванны в заданных пределах. С увеличением силы тока глубина металлической ванны возрастает. Зависимость имеет характер, близкий к линейному. На ширину ванны изменение силы тока влияет незначительно.

Изменение напряжения на электроде заметно влияет на ширину металлической ванны. Зависимость имеет прямолинейный характер.

На практике ширину ванны и выпуклость шва в заданных пределах изменяют регулированием напряжения на электродах, с увеличением которого несколько возрастает также и глубина металлической ванны.

Изменение скорости сварки для сохранения стабильности процесса требует изменения других параметров режима, особенно силы сварочного тока. При увеличении скорости сварки наблюдается углубление металлической ванны. Ширина ее изменяется по более сложной зависимости, имеющей максимум.

К дополнительным параметрам режима ЭШС относятся величина зазора, скорость подачи электрода, число электродов и площадь их поперечного сечения, глубина шлаковой ванны, состав флюса.

Их влияние на размеры металлической ванны и шва проявляются слабее. Для сохранения стабильности процесса изменение скорости подачи электрода требует и соответствующего изменения силы тока. Следовательно, с увеличением скорости подачи электрода увеличивается и глубина металлической ванны.

При недостаточной глубине металлической ванны возрастает вероятность образования дугового разряда внутри ванны либо на ее поверхности. Глубина шлаковой ванны поддерживается в пределах 30...90 мм.

При ЭШС должно соблюдаться равенство мощности, выделяемой в шлаковой ванне, и мощности, необходимой для образования металлической ванны и шва. Стабильность процесса возрастает при применении источников переменного тока с малым внутренним сопротивлением (жесткой вольт-амперной характеристикой).

Используемые материалы. При ЭШС используется электродная проволока диаметром 3...5 мм (ГОСТ 2346—70) и флюсы (ГОСТ 9087—69). Для ЭШС применяются плавленые флюсы, причем при сварке протяженных стыков конструкций из углеродистых и низколегированных сталей электродными проволоками Св-08А, Св-08ГА, Св-08Г2С следует применять флюсы АН-8, АН-8М с лучшими технологическими свойствами, а при сварке конструкций из легированных сталей — флюс АН-22.

Флюсы для ЭШС обеспечивают быстрое и легкое начало процесса и поддерживают устойчивое его течение даже при небольшой глубине сварочной ванны, не отжимают ползуны от кромок свариваемой детали, обеспечивают хорошее качество поверхности шва и образуют легко отделяемый шлак. Все флюсы для ЭШС имеют высокую температуру кипения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое газопламенная обработка?
2. Почему для газопламенной сварки не рекомендуется применять газовоздушное пламя?
3. Какой термин правильнее: «газовая сварка», «автогенная сварка» или «газопламенная сварка»?
4. Почему при газопламенной сварке свариваемые кромки нагреваются медленнее, чем при дуговой?
5. Какие недостатки газопламенной сварки связаны с медленным нагревом свариваемых кромок?
6. Для выполнения каких типов соединений деталей преимущественно применяется газопламенная сварка?

7. В чем заключается преимущество газопламенной сварки по сравнению со сваркой с электрическим нагревом?
8. Каковы основные области применения газопламенной сварки?
9. Какие горючие газы применяются при газопламенной сварке?
10. В каком виде хранится ацетилен в баллонах?
11. Какое свойство горючего газа определяет область его применения при газопламенной сварке?
12. Что такое коэффициент замены ацетилена?
13. Как получают ацетилен?
14. Как расшифровываются обозначения проволоки Св-10ГА, Св-12Х11НМФ?
15. Для чего при газопламенной сварке применяются флюсы?
16. Какие требования предъявляются к флюсам для газопламенной сварки?
17. Какие зоны можно выделить в сварочном пламени?
18. В чем состоит отличие левого и правого способов газопламенной сварки?
19. Что такое режим сварки?
20. Перечислите параметры режима газопламенной сварки.
21. Как свариваются вертикальные швы?
22. Как свариваются горизонтальные швы?
23. Как лучше свариваются потолочные швы?
24. Что такое ступенчатая и обратноступенчатая сварка?
25. По каким траекториям и зачем следует колебать мундштук горелки и присадочную проволоку при газопламенной сварке?
26. В чем заключаются преимущества ручной дуговой сварки по сравнению с другими способами?
27. Какие общие требования предъявляются к электродам для ручной дуговой сварки?
28. Какие вещества вводятся в сварочные электроды?
29. Какие элементы вводятся в состав электродных покрытий для предохранения металла сварочной ванны от окисления?
30. Как расшифровываются обозначения электродов Э46, Э55?
31. Какие приемы применяются для возбуждения дуги?
32. Какие приемы применяются для заполнения разделки при выполнении многопроходного шва?
33. Перечислите параметры режима ручной дуговой сварки.
34. Как выбирается сила сварочного тока?
35. Какими методами можно бороться с магнитным дутьем?
36. Как выбираются электроды для сварки в потолочном, горизонтальном и вертикальном положении?
37. Зачем в состав электродных покрытий вводится железный порошок?
38. В чем состоит суть процесса дуговой сварки под слоем флюса?

39. В чем заключаются преимущества сварки под слоем флюса по сравнению со сваркой открытой дугой?
40. Для чего при ручной дуговой сварке служит флюс?
41. Как подразделяются флюсы по назначению и способу изготовления?
42. Как выбрать сварочный флюс и электродную проволоку для получения металла шва заданного состава?
43. Перечислите параметры режима дуговой сварки под слоем флюса.
44. Как влияют сила тока, напряжение дуги и скорость сварки на форму шва?
45. Как обеспечить качественное проплавление при сварке стыковых соединений?
46. Зачем нужна многодуговая сварка под слоем флюса?
47. С помощью каких приемов возбуждается дуга при сварке под слоем флюса?
48. Какие приемы применяются для заварки кратера при сварке под слоем флюса?
49. Какова основная особенность дуговой сварки в среде защитных газов?
50. Чем обеспечивается местная защита зоны дуговой сварки в среде инертных газов?
51. Какие газы используются для защиты зоны сварки?
52. Какие неплавящиеся электроды применяются при дуговой сварке в среде защитных газов?
53. В чем заключаются преимущества дуговой сварки в среде защитных газов по сравнению с другими способами сварки?
54. Что такое порошковая проволока?
55. Что такое самозащитная проволока?
56. В чем заключаются преимущества порошковых проволок по сравнению со сплошными?
57. Перечислите основные параметры режима сварки в среде защитных газов.
58. Какие приемы колебаний горелки применяются при ручной дуговой сварке в среде защитных газов?
59. Что такое сварка углом вперед и углом назад?
60. Какие приемы применяются при сварке вертикальных и горизонтальных швов?
61. Какие приемы применяются при сварке потолочных швов?
62. В каких отраслях производства нашла широкое применение ЭШС?
63. Чем отличается дуговая сварка от ЭШС?
64. В чем состоит суть ЭШС?
65. Какие три способа ЭШС применяются и в чем состоит их различие?

66. Как тепловыделение и термический цикл ЭШС влияют на структуру металла шва и околошовной зоны?
67. Что такое режим ЭШС?
68. Перечислите параметры режима ЭШС.
69. Каким требованиям должна соответствовать сборка стыков для ЭШС?
70. Какие виды сварных соединений выполняются способом ЭШС?
71. Медные водоохлаждаемые формирующие устройства каких конструкций применяются при ЭШС?
72. Какие материалы применяются при ЭШС?

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

2.1. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

Технологические возможности сжатой дуги. Плазменная сварка является одним из видов дуговой сварки. В качестве источника нагрева свариваемых заготовок используется **сжатая дуга**.

Первое упоминание о разработке плазменной сварки относится к 1950-м гг. В течение 1960-х гг. были предложены несколько принципов формирования плазменно-газового потока, разработаны и внедрены в производство оборудование и технология плазменной сварки, которые продолжают развиваться и совершенствоваться. Область ее применения постоянно расширяется.

При традиционной дуговой сварке дуга горит свободно между электродом и свариваемой деталью. Однако, если с помощью каких-либо приемов не дать дуге занять весь этот объем, принудительно сжав ее, то температура дуги значительно повысится. В частности, можно сжать дугу, пропустив ее через сопло малого диаметра. При этом плазмообразующий газ, вытекая через сопло горелки, сжимает дугу. Часть газа, проходя через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде плазменной струи. Наружный слой газа, омывающий столб дуги, остается относительно холодным и создает электрическую и тепловую изоляцию между дугой и соплом плазматрона, предохраняя его от разрушения.

Плазма — это частично или полностью ионизированный газ, состоящий из нейтральных атомов, молекул, ионов и электронов. Типичное плазменное состояние вещества имеет место в электрическом газовом разряде. Плазма газового разряда в зависимости от состава среды характеризуется температурами 2 000... 50 000 °С. В дугах средней мощности (сила тока до 1 000 А) температура плазмы 5 000... 20 000 °С.

Схема процесса. Плазменной называется сварка сжатой дугой. Столб дуги помещается в узкий канал, который ограничивает его расширение. Устройство для получения сжатой дуги называется

плазматроном. Простейший плазматрон состоит из изолятора, неплавящегося электрода и медного водоохлаждаемого сопла. В сопло тангенциально (по касательной к его цилиндрической поверхности) или аксиально (вдоль оси электрода) подается плазмообразующий газ (инертный, нейтральный или содержащий кислород), который в столбе дуги нагревается до высокой температуры. Плазматроны могут работать на постоянном или переменном токе.

Различают плазматроны прямого и косвенного действия (рис. 2.1). В плазматронах косвенного действия дуга горит между неплавящимся электродом и соплом плазматрона. Такие плазматроны применяются для обработки неэлектропроводных материалов и для нагрева газа. Для сварки чаще применяются плазматроны прямого действия. В них дуга горит между электродом и обрабатываемой деталью. Расстояние между ними в плазматроне больше, чем при сварке горелками для свободной дуги, поэтому сжатая дуга возбуждается в две стадии. После подачи в плазматрон газа искровым разрядом от осциллятора или путем замыкания промежутка электрод—сопло графитовым стержнем возбуждается вспомогательная (дежурная) дуга между электродом и соплом. При использовании второго варианта возбуждения вспомогательной дуги повышается износ электрода и сопла. Дежурная дуга питается от отдельного маломощного источника или от основного источника через ограничивающее сопротивление (чтобы ограничить ее ток и уменьшить износ сопла). Под действием газа дежурная дуга образует струю плазмы небольшой мощности, которая при сопри-

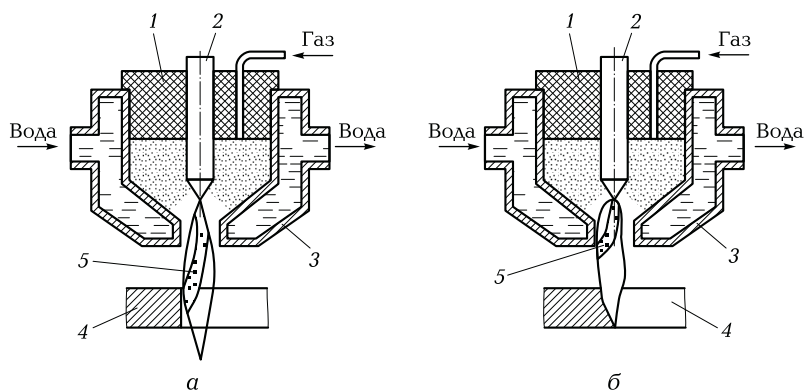
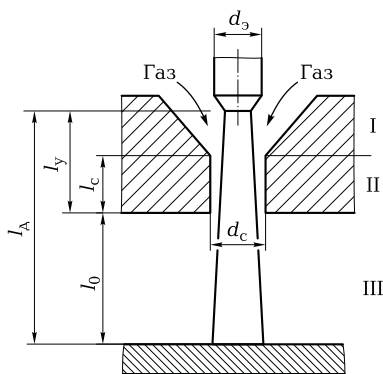


Рис. 2.1. Схемы плазматронов прямого (а) и косвенного (б) действия:
 1 — изолятор; 2 — неплавящийся электрод; 3 — сопло плазматрона; 4 — свариваемая деталь; 5 — сжатая дуга

Рис. 2.2. Основные участки столба сжатой дуги и ее геометрические характеристики:

I — досопловый участок; II — участок сжатия; III — открытый участок; d_3 — диаметр электрода; d_c , l_c — диаметр и длина цилиндрического участка сопла; l_y — длина закрытого участка дуги; l_0 — расстояние от торца плазматрона до свариваемой детали; l_d — длина дуги



косновении с деталью возбуждает основную (рабочую) дугу. Если в цепь детали включить контактор, то рабочую дугу можно возбуждать в нужный момент времени. При автоматической сварке после возбуждения рабочей дуги дежурная дуга может отключаться. При ручной сварке дежурная дуга должна гореть постоянно.

Столб сжатой дуги состоит из досоплового участка I, участка сжатия II и открытого участка III (рис. 2.2). Физические свойства каждого участка существенно различаются между собой и отличаются от свойств свободной дуги. Свойства катодной и анодной областей сжатой и свободной дуг отличаются незначительно. На участке II сжатая дуга приобретает технологические преимущества по сравнению со свободной дугой.

Напряжение сжатой дуги всегда выше, чем свободной, при одинаковой длине. Это объясняется тем, что при сжатии дуги стенками сопла в ней возрастает плотность тока, это ведет к увеличению напряженности электрического поля.

Основные параметры сжатой дуги: диаметр d_c и длина l_c цилиндрического участка сопла, расстояние l_0 от сопла плазматрона до свариваемой детали, сила тока I_A дуги и расход G_n плазмообразующего газа.

Плазмообразующий газ проникает в столб дуги и, проходя вдоль канала, нагревается. Плотность газа уменьшается, возрастает его объем. По мере движения газа вдоль канала резко увеличивается его скорость. Она достигает максимума на выходе из сопла. Нагретый в дуге газ, сталкиваясь с поверхностью свариваемой детали, нагревает и оплавляет ее. Под давлением газа расплавленный металл раздвигается, теплота передается непосредственно твердому металлу дна сварочной ванны. Поэтому эффективная тепловая мощность в два раза выше, чем у свободной дуги. Меняя расход газа

и диаметр канала сопла, можно изменять давление струи плазмы, а также плотность теплового потока, передаваемого от дуги к детали. Это является основными технологическими преимуществами сжатой дуги, позволяющими регулировать размеры и форму сварочной ванны. В сжатой дуге достигается более высокая плотность теплового потока (особенно при малой мощности дуги), что позволяет получить узкие швы с малой шириной зоны термического влияния и увеличить скорость сварки.

Плазмообразующий газ передает детали значительную долю общей полезной мощности, а нагрев газа сильно зависит от всех параметров режима, поэтому эффективный КПД сжатой дуги можно изменять в пределах 30...80%. Еще одним преимуществом сжатой дуги является ее повышенная пространственная устойчивость, позволяющая уменьшить блуждание активного пятна по поверхности детали из-за стабилизирующего действия плазмообразующего газа, что улучшает качество шва. Состав плазмообразующего газа (аргон, гелий, азот) выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. Electroды чаще изготавливаются из меди и вольфрама. Стенки камеры защищены от теплового воздействия дуги слоем сравнительно холодного газа.

Ярко светящееся ядро плазменной струи с основанием несколько меньшим, чем размер выходного отверстия сопла, окружено менее светящимся факелом. Длина струи определяется мощностью дуги, размерами сопла, видом газа и его расходом. При ламинарном истечении газа (для низких скоростей струи) наблюдается длинная, мало смешивающаяся с окружающей атмосферой струя плазмы. Короткая струя плазмы наблюдается при турбулентном истечении газа (для высоких скоростей струи). Формой сопла можно задавать очертание плазменной струи и тем самым распределение теплового и силового воздействия по поверхности свариваемой детали.

Температура плазменной струи крайне неравномерно распределяется по радиусу r и длине l (рис. 2.3). Максимальная температура наблюдается в центре струи. В токоведущей части плазменной струи вблизи катода температура газа достигает 24 000...32 000 °С.

Плазменная струя обычно характеризуется среднemasсовой температурой на срезе сопла плазменной горелки, которую можно определить по удельной энтальпии H плазмообразующего газа:

$$H = q/G, \quad (2.1)$$

где q — эффективная мощность плазменной струи на срезе сопла, Дж/с; G — массовый расход плазмообразующего газа, г/с.

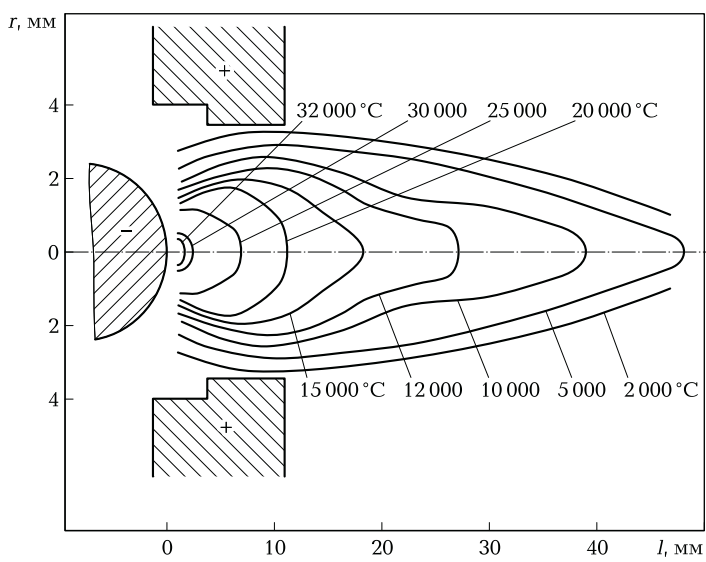


Рис. 2.3. Распределение температуры плазменной струи по радиусу r и длине l

Основные параметры плазменной струи плазмобразующих газов, чаще всего используемых при плазменной сварке, приведены в табл. 2.1.

Среднемассовая температура плазменной струи ниже ее осевой температуры.

Напряжение сжатой дуги существенно зависит от рода плазмобразующего газа, поскольку способность поглощать энергию при высокой температуре дуги у всех газов разная. Более высокое

Таблица 2.1. Основные параметры плазменной струи (при мощности дуги 25 кВт)

Плазмобразующий газ	Расход газа, г/с	КПД, %	Удельная энтальпия H , МДж/м ³	Среднемассовая температура плазмы, °С
Азот	0,5	60	37,681	7 080
Водород	0,1	80	18,066	3 800
Воздух	0,5	50	32,490	6 650
Аргон	0,5	40	35,775	13 830

Примечание. 1 Дж = 0,2388 кал.

напряжение имеет дуга, горящая в газе, имеющем большую теплоемкость и теплопроводность. В качестве плазмообразующих газов используются аргон, гелий, углекислый газ, воздух, кислород, азот, водород и смеси газов. При сварке в большинстве случаев используется аргон, который имеет хорошие защитные свойства и обеспечивает высокую стойкость электрода. Теплоемкость и теплопроводность аргона низкие, поэтому дуга в нем имеет самое низкое напряжение, что удобно при ручной сварке. На практике чаще применяется дуга прямой полярности, обеспечивающая более высокую стойкость неплавящегося электрода. Такая дуга передает детали наибольшую мощность, поэтому ею свариваются конструкции из высоколегированных сталей, титановых сплавов, меди. При сварке конструкций из алюминиевых сплавов сжатая дуга прямой полярности не используется, так как не обеспечивает разрушения тугоплавкой оксидной пленки. Хорошо разрушается пленка оксида алюминия при сварке аргоновой сжатой дугой обратной полярности, однако при этом низка тепловая эффективность передачи теплоты детали и высока тепловая нагрузка на электрод плазматрона (анод). Критическое значение силы тока для конкретного диаметра электрода в этом случае в 20 раз меньше, чем при прямой полярности. Для повышения стойкости электродов применяются плазматроны с интенсивным охлаждением электрода.

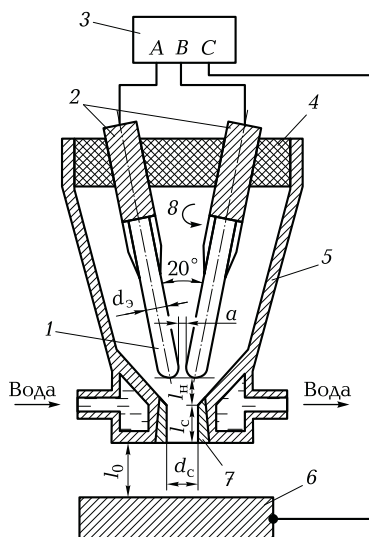
Промежуточное положение по своим параметрам занимает дуга переменного тока. При переменном токе электрод является попеременно катодом и анодом, что обеспечивает его стойкость. Разрушение оксидной пленки в полупериод обратной полярности происходит достаточно интенсивно, что обеспечивает хорошее качество сварного соединения.

Главный недостаток дуги переменного тока — низкая устойчивость повторных возбуждений при смене полярности. В сжатой дуге этот недостаток усугубляется, так как ее столб интенсивно охлаждается плазмообразующим газом. Чтобы повысить устойчивость дуги, необходимо обеспечить высокое напряжение источника питания или использовать специальные стабилизаторы, поэтому сжатая однофазная дуга переменного тока используется мало.

Разновидностью дуги переменного тока является трехфазная дуга. В плазматроне для трехфазной сжатой дуги (рис. 2.4) устанавливаются два неплавящихся электрода. Дежурной дугой служит дуга между этими электродами, а сопло остается электрически нейтральным. Дежурная дуга питается от фаз основного источника питания. Когда дуги между электродами и деталью еще не возбуждены, сила тока межэлектродной дуги невелика, но достаточна для

Рис. 2.4. Схема плазматрона для трехфазной сжатой дуги:

1 — вольфрамовые электроды; 2 — токоподводы-электрододержатели; 3 — источник сварочного трехфазного тока [A, B, C — фазы); 4 — изолятор; 5 — корпус плазматрона; 6 — свариваемая деталь; 7 — тупоугольная вставка-сопло; 8 — аргон; a — установочный зазор между электродами; l_c — длина сопла; l_n — расстояние от электрода до внутреннего торца сопла; $d_э$ — диаметр электрода; d_c — диаметр сопла; l_0 — расстояние от сопла плазматрона до свариваемой детали



возбуждения основных дуг. Для ограничения силы тока дежурной дуги не требуется никаких специальных устройств.

При возбуждении трех рабочих дуг электрод — деталь легко получить отношение силы тока в детали к силе тока в электроде: $K_T = 1,73$. Это позволяет уменьшить диаметр электродов и габаритные размеры и массу плазматрона, что важно для ручной сварки. Другое достоинство трехфазной сжатой дуги — повышение стабильности повторных возбуждений в моменты перемены полярности, так как межэлектродная дуга постоянно ионизирует дуговые промежутки электрод — деталь. Благодаря этому трехфазная дуга по устойчивости близка к дуге постоянного тока.

Энергетические возможности сжатых дуг ограничиваются опасностью возникновения аварийного режима работы плазматрона — двойного дугообразования. При увеличении силы тока сжатой дуги до определенного значения столб рабочей дуги распадается, образуя каскад дуг. Возникают две дуги: электрод — сопло и сопло — деталь (рис. 2.5). Активные пятна этих

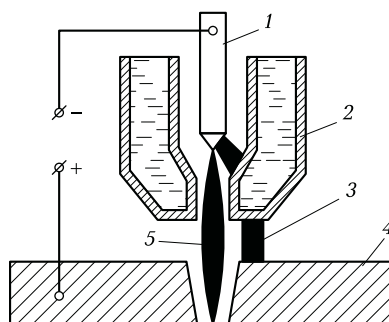


Рис. 2.5. Двойная дуга:

1 — неплавящийся электрод; 2 — сопло плазматрона; 3 — дуга сопло — деталь; 4 — свариваемая деталь; 5 — дуга электрод — сопло

мощных дуг быстро разрушают сопло и могут полностью вывести его из строя. Уменьшение диаметра сопла и расхода плазмообразующего газа и увеличение длины l_c сопла в разной степени влияют на возникновение аварийных дуг аналогично силе тока.

Причины возникновения двойной дуги объясняются следующим. Между столбом дуги и стенками канала сопла находится изолирующая прослойка непроводящего «холодного» газа, средняя температура которого 2 000 ... 3 000 °С. Толщина этой прослойки составляет 3...5 % диаметра канала. В плазме столба дуги движутся нейтральные атомы, положительные ионы и электроны, обладающие значительно большей подвижностью из-за малой массы. Часть электронов, обладая высокой скоростью, проскакивает изолирующую прослойку и стекает на сопло. Вследствие этого сопло заряжается отрицательно относительно столба дуги. Наименьшая разность потенциалов имеет место в сечении вблизи электрода, а наибольшая — на выходе газа из сопла. Если разность потенциалов между столбом дуги и стенкой сопла достигнет некоторого критического значения, то на поверхности сопла возникнет катодное пятно дуги сопло — деталь. Возникновение второго активного пятна в этом случае весьма вероятно.

Показателем опасности возникновения аварийного режима является отношение

$$E_{\text{пр}} = U_c / \Delta, \quad (2.2)$$

где $E_{\text{пр}}$ — средняя напряженность электрического пробоя газовой прослойки между электродом и соплом, В/см; U_c — падение напряжения в столбе дуги на участке II (см. рис. 2.2), В/см; Δ — толщина изолирующей прослойки газа в конечном сечении сопла, см.

Чем выше $E_{\text{пр}}$, тем больше вероятность возникновения двойной дуги. Параметры режима влияют на U_c и Δ . С уменьшением d_c сильно возрастает U_c и уменьшается Δ , что приводит к значительному росту $E_{\text{пр}}$. Опасность возникновения аварийного режима возрастает. С ростом расхода газа также увеличивается U_c , но увеличивается и толщина прослойки. Расчетный параметр $E_{\text{пр}}$ все-таки уменьшается с увеличением расхода газа. Это говорит о снижении опасности возникновения двойной дуги, что совпадает с практикой. Знание величины $E_{\text{пр}}$ позволяет подбирать оптимальные режимы горения конкретных сжатых дуг.

Для борьбы с двойным дугообразованием применяются и конструктивные приемы, например, на некотором расстоянии от канала в сопло устанавливается вставка из вольфрама, немного выступающая от торца сопла. После возникновения двойной дуги ее ак-

тивное пятно вращается вокруг канала под действием магнитного поля дуги. Достигнув вставки, активное пятно закрепляется на ней и аварийная дуга горит так же, как свободная дуга. Она фиксируется на вставке из-за меньшего приэлектродного напряжения дуги для вольфрамового электрода, чем для медного. Поэтому медное сопло не разрушается.

Тип и конструкция катода плазматрона определяются составом плазмообразующего газа. Для работы в инертных газах (аргон, азот и их смеси) применяются катоды из вольфрама. Они выполняются в виде прутка, который фиксируется цанговым зажимом, закрепленным в электродном узле плазматрона, или в виде медной державки с запрессованным в нее стержнем вольфрама. Схемы катодных узлов плазматрона приведены на рис. 2.6. Последняя конструкция предпочтительнее, так как благодаря лучшим условиям для отвода теплоты обеспечивает более высокую плотность тока на катоде и позволяет уменьшить расход дорогостоящего вольфрама.

Катоды плазматронов, работающих в кислородосодержащих плазмообразующих газах (рис. 2.7), называются термохимическими. Они представляют собой активные вставки из гафния и циркония, которые запрессовывают заподлицо в медные державки с диаметром, соответствующим силе тока дуги.

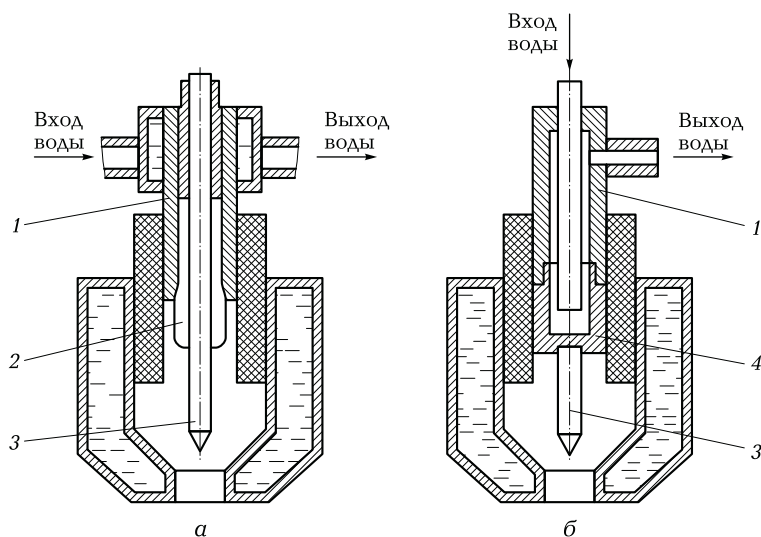


Рис. 2.6. Схемы катодных узлов плазматрона:

а — с цанговым зажимом; б — с медной державкой; 1 — корпус катодного узла; 2 — цанговый зажим; 3 — вольфрамовый катод; 4 — медная державка

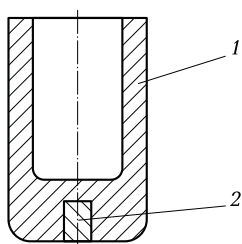


Рис. 2.7. Схема катода плазматрона для работы в кислородосодержащих плазмообразующих газах:

1 — медная державка; 2 — активная вставка из циркония или гафния

Назначение сопла — регулирование энергетических характеристик дуги. К основным параметрам сопла относятся диаметр и высота канала, форма рабочей камеры плазматрона. Диаметр и высота сопла выбираются в зависимости от силы рабочего тока, состава и расхода плазмообразующего газа. При этом приходится подбирать наиболее благоприятное сочетание таких показателей, как технологические возможности и надежность работы плазматрона, стойкость сопла и электрода. Наиболее важным является показатель надежности.

Аксиальная подача газа в дуговую камеру дает возможность лучше воздействовать на обрабатываемую деталь потоком истекающей из сопла плазмы. Однако при этом ухудшается пространственная стабилизация столба дуги и увеличивается вероятность двойного дугообразования. Поэтому предпочтительна тангенциальная подача газа. Одним из элементов дуговой камеры является вихревая закрутка, которая обеспечивает тангенциальную подачу плазмообразующего газа в канал сопла. Конструктивно закрутка представляет собой многозаходную резьбу (3—6 заходов) с большим шагом (6...12 мм), выполненную на боковой поверхности электрододержателя концентрично ей.

К материалу изолятора плазматрона предъявляются разнообразные (иногда и противоречивые) требования: высокая электрическая прочность, поскольку дежурная дуга возбуждается с помощью высоковольтного высокочастотного разряда осциллятора; высокая механическая прочность, так как изолятор часто выполняет функции несущей конструкции, на которой крепятся остальные узлы плазматрона; термостойкость, так как отдельные части изолятора подвержены действию теплового и светового излучения; герметичность, поскольку через изолятор проходят коммуникации плазмообразующего газа и охлаждения; возможность обработки обычным режущим инструментом.

Достоинства и недостатки способа. Исследования в области плазменных технологий играют большую роль в развитии авиа-

и ракетостроения, электроники, ядерной энергетики, криогенной техники. Основное внимание уделяется улучшению качества сварки при выполнении соединений различных типов из алюминия, коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов и титана.

В конце 1960-х гг. сварка проникающей плазменной дугой переменного тока использовалась в СССР в производстве алюминиевых топливных баков ракет. Аналогичная технология спустя 10 лет была внедрена в США взамен аргонодуговой сварки наружных алюминиевых топливных баков для многоразового космического корабля «Шаттл». Этой технологии отводится большая роль и при строительстве космических станций. В 1989 г. NASA использовала технологию плазменной сварки при изготовлении твердотопливных двигателей космической ракеты, доставляющей на орбиту элементы конструкций для сборки международной космической станции Freedom.

Сварка сжатой дугой применяется при изготовлении конструкций из высоколегированных сталей, титана, никелевых сплавов, молибдена, вольфрама и многих других металлов и их сплавов.

Плазменная сварка обладает значительными преимуществами по сравнению с другими способами сварки:

- стабильное горение дуги. При этом обеспечивается более равномерное проплавление кромок, чем при аргонодуговой сварке;
- проплавляющая способность выше, чем при сварке дугой, горящей в аргоне;
- цилиндрическая форма столба дуги и струи плазмы, за счет чего площадь поверхности металла, через которую происходит теплопередача от струи к металлу, зависит от расстояния между электродом горелки и деталью;
- низкая чувствительность к изменению длины дуги. Изменение длины дуги конической формы (при аргонодуговой сварке) всегда ведет к изменению диаметра пятна нагрева и изменению ширины шва. Плазменная сварка позволяет иметь практически постоянный диаметр пятна и дает возможность стабилизировать проплавление основного металла. Это свойство плазменной дуги с успехом используется при сварке очень тонких листов.

Одним из существенных недостатков плазменной сварки является возможность образования двойной (каскадной) дуги, возникающей при повышенной плотности сварочного тока. Образование дуги между соплом плазматрона и свариваемой деталью приводит к оплавлению сопла и уменьшению силы тока основной дуги.

Технология сварки. При сварке сжатой дугой пятну нагрева может быть придана разная форма путем применения специальных плазмобразующих сопел (рис. 2.8). Если необходимо получить пятно нагрева вытянутой формы, то в сопле выполняются два дополнительных отверстия, через которые поступает холодный плазмобразующий газ, уменьшающий поперечный размер пятна нагрева и придающий ему вытянутую форму. При сварке таким соплом зона термического влияния сужается, а скорость сварки возрастает на 50... 100 %. Соплом с дополнительным каналом создается фокусирующий газовый поток, направленный под углом к оси столба дуги и сжимающий дугу.

При плазменной сварке применяется сварочный ток силой 3... 300 А, напряжение дуги 25... 35 В, средняя скорость сварки составляет 30... 50 м/ч. Расход аргона в 5—6 раз меньше, чем при сварке свободной дугой. Сжатой дугой свариваются детали толщиной 0,01 ... 10 мм, и отношение глубины проплавления к ширине шва (коэффициент формы шва) составляет 3:1 при толщине свариваемых кромок 3... 10 мм.

Сжатой дугой можно производить сварку с глубоким проплавлением, при этом в сварочной ванне образуется сквозное отверстие

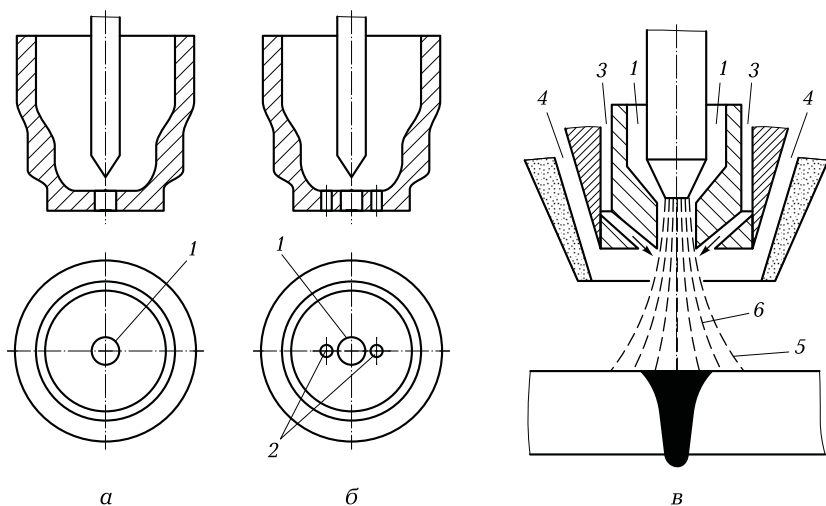


Рис. 2.8. Схемы плазмобразующих сопел с центральным каналом (а), центральным каналом и боковыми отверстиями (б) и с дополнительным газовым каналом (в):

1 — канал для холодного плазмобразующего газа; 2 — боковые отверстия для подачи фокусирующего газа; 3 — канал для фокусирующего газа; 4 — канал для защитного газа; 5 — несфокусированная дуга; 6 — сфокусированная дуга

стие, которое при взгляде сверху напоминают по форме замочную скважину. Столб дуги при этом погружается в ванну почти на всю толщину кромки, выдавливая жидкий металл. При движении дуга как бы раздвигает расплавленный металл, направляя его в хвостовую часть ванны. Процесс похож на плазменную резку, но жидкий металл из ванны не удаляется. С обратной стороны детали через отверстие вырывается факел остывающего газа. Такой способ сварки требует очень точного поддержания параметров режима сварки и качественной подготовки стыка, так как металл в ванне удерживается только за счет сил поверхностного натяжения.

Расход плазмообразующего газа устанавливается таким, чтобы его истечение из сопла было спокойным, без завихрений. Давление плазменной струи на поверхности сварочной ванны не должно мешать качественному формированию шва.

Особенно эффективно сжатой дугой выполняется сварка листов толщиной до 9,5 мм (в отдельных случаях — до 13 мм) встык за один проход без разделки кромок и без присадки. Сжатой дугой можно вести сварку практически в любом пространственном положении. При сварке листов толщиной до 25 мм требуется V- или U-образная разделка кромок, причем глубина и угол разделки значительно меньше, чем при сварке открытой дугой в аргоне. Количество присадочного металла при сварке сжатой дугой снижается в три раза. Для предохранения металла шва от окисления обратную сторону шва рекомендуется защищать инертным газом с помощью подкладных планок с канавками.

При сварке сжатой дугой наряду с общеизвестными параметрами режима дуговой сварки назначается диаметр сопла плазматрона, а также состав и расход плазмообразующего газа (табл. 2.2).

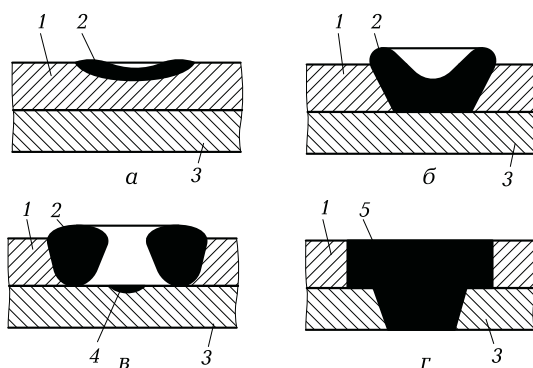
Сварка труб сжатой дугой производительнее, чем другие способы сварки. Замена аргонодуговой сварки открытой дугой на сварку сжатой дугой при изготовлении труб из коррозионно-стойкой стали с толщиной стенки 2,3...7 мм позволяет увеличить скорость сварки на 50...200 %.

Характерным примером технологических возможностей сжатой дуги является точечная сварка тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов трехфазной сжатой дугой (рис. 2.9). Процесс сварки в этом случае состоит из нескольких стадий. На начальной стадии происходит образование сварочной ванны на верхнем листе. С увеличением ванны под действием давления дуги возникает углубление и при достижении определенного диаметра ванны в ней образуется отверстие. Жидкий металл на верхнем листе приобретает форму тора.

Таблица 2.2. Режимы сварки сжатой дугой некоторых конструкционных материалов

Металл	Толщина детали, мм	Скорость сварки, м/ч	Диаметр сопла плазматрона, мм	Сила сварочного тока, А	Плазмообразующий газ		Защитный газ	
					Состав	Расход, м ³ /ч	Состав	Расход, м ³ /ч
Коррозионно-стойкая сталь	3,2	0,97	—	145	Ar + 7,5% H ₂	0,28	Ar + 7,5% H ₂	0,99
	6,4	0,36	—	240		0,5		1,41
	12,7	0,19	2,4	305		0,14		
Титан	3,2	0,51	2,4	185	Ar	0,23	Ar	0,85
	12,7	0,25		285	0,11			
Алюминий	6,4			85	He + Ar	0,085 + 0,028		

Активное пятно дуги перемещается на поверхность нижнего листа (о чем свидетельствует приращение напряжения на дуге) и в полупериоды обратной полярности очищает ее от оксидной пленки. На нижнем листе образуется сварочная ванна. Когда ее край до-


Рис. 2.9. Стадии процесса точечной сварки трехфазной сжатой дугой:

а — начало процесса; *б* — выдавливание металла сварочной ванны; *в* — образование отверстия верхнего листа и начало оплавления нижнего листа; *г* — сформировавшаяся сварная точка; 1 — верхний свариваемый лист; 2 — сварочная ванна верхнего листа; 3 — нижний свариваемый лист; 4 — сварочная ванна нижнего листа; 5 — общая сварочная ванна

стигает жидкого металла верхнего листа, обе сварочные ванны сливаются, отверстие «захлопывается». На нижнем листе образуется проплав. Поперечное сечение сварной точки получается равномерным по толщине и его размеры можно регулировать в широких пределах. Высокое качество соединения обеспечивается за счет полного разрушения оксидной пленки и возможностью контроля сквозного провара. Скачок напряжения при погружении дуги служит сигналом окончания процесса сварки.

Перспективным является способ плазменной сварки, основанный на одновременном нагреве сварочной ванны плазменной дугой и лучом лазера. Этот комбинированный способ сварки обладает целым рядом особенностей, которые нельзя объяснить простой суперпозицией свойств используемых источников нагрева, взятых отдельно. Так, за счет поглощения лазерного излучения в плазме реализуется особый вид газового разряда — комбинированный лазерно-дуговой разряд.

Еще одним способом плазменной сварки, разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона, является плазменно-порошковая сварка, когда присадочный порошок подается в плазму и заполняет разделку. Процесс проверен при механизированной и ручной сварке во всех пространственных положениях пластин толщиной 1...50 мм. Варьирование составов присадочных порошков позволяет получать разнообразные неразъемные соединения из металлических, композиционных и керамических материалов.

Широкое распространение получила сварка проникающей плазменной дугой («в замочную скважину»), когда вольфрамовый электрод заглублен внутрь сопла. При этом плазменная дуга приобретает столбообразную форму. Сосредоточенный столб дуги прожигает отверстие перед фронтом сварочной ванны, проплавливая стыковое соединение на всю толщину свариваемых кромок. При движении плазменной горелки вперед расплавленный металл под действием поверхностного натяжения заполняет проплавленное отверстие, формируя аккуратный сварной шов с отношением глубины к ширине 1:1. Сварка «в замочную скважину» позволяет сваривать пластины толщиной до 8 мм без предварительной разделки кромок и подачи присадочного материала. При толщине пластин до 12 мм на них выполняются фаски 4...5 мм с притуплением кромок под углом 60°, и сварка выполняется с подачей присадочного материала.

В Великобритании разработана новая схема плазменной точечной сварки (рис. 2.10). Заглубленный в корпус сопла вольфрамовый электрод создает столбообразную дугу, что обеспечивает почти

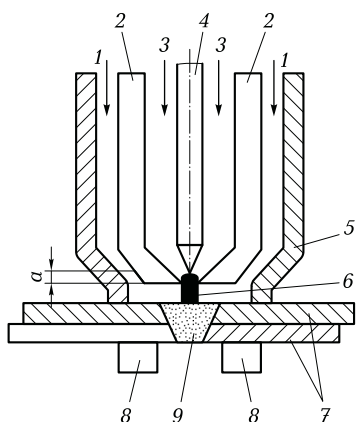


Рис. 2.10. Принципиальная схема плазменной точечной сварки:

1 — защитный газ; 2 — сжимающее сопло; 3 — плазмообразующий газ; 4 — вольфрамовый электрод; 5 — защитное сопло; 6 — плазменная дуга; 7 — свариваемые пластины; 8 — прижим (при необходимости); 9 — сварочная ванна; а — заглубление электрода

равномерный ввод теплоты при длине дуги 3... 10 мм. В результате качество процесса перестает зависеть от расстояния между свариваемой деталью и плазматроном, что гарантирует стабильные условия сварки. Масса сварочной головки (совокупность плазматрона и механизмов его перемещения) не превышает 10 кг (для сравнения — при сварке сопротивлением масса сварочной головки составляет более 80 кг). Снижение массы головки позволяет применять для сварки технологический робот. Перемещением робота управляет ЭВМ, программа которой включает в себя 32 варианта сварки в зависимости от толщины, количества и комбинации свариваемых листов. ЭВМ обеспечивает непрерывное управление силой сварочного тока и напряжением, поддерживая постоянную мощность дуги.

Микроплазменная сварка. Сварка малоамперной сжатой дугой (на токах

0,1... 10 А) — микроплазменная сварка — применяется для соединения деталей с толщиной кромок 0,025... 0,8 мм. Изменение длины малоамперной сжатой дуги значительно меньше сказывается на качестве сварного соединения по сравнению со сваркой открытой дугой. При этом сильно возрастает пространственная устойчивость дуги.

При микроплазменной сварке в качестве плазмообразующего газа используется аргон, а в качестве защитного — аргон, гелий, азот, смеси аргона с водородом или с гелием и другие газы в зависимости от свариваемого металла.

Катодная область малоамперной сжатой дуги постоянного тока находится в атмосфере плазмообразующего газа, а столб дуги и анодная область — в атмосфере защитного газа.

Применение в защитной смеси молекулярных газов (азота, водорода) повышает напряжение дуги, увеличивает ее проплавленную способность, так как в столбе дуги молекулы этих газов диссоциируют, поглощая энергию, что приводит к дополнительному

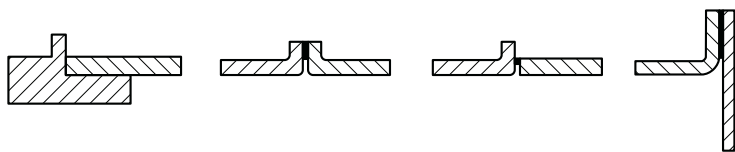


Рис. 2.11. Соединения с отбортовкой, выполняемые способом микроплазменной сварки

сжатии дуги. Дуга приобретает форму конуса (иглы), сужающегося к свариваемой детали. Плотность тока на острие этого конуса достигает 5000 А/см^2 .

По сравнению с аргонодуговой сваркой микроплазменная сварка имеет несколько важных преимуществ:

- изменение длины микроплазменной дуги значительно меньше влияет на качество сварного соединения деталей малой толщины;
- дежурная плазменная дуга гарантировано возбуждается при силе тока менее 1 А;
- облегчается доступ к объекту сварки и визуальный обзор рабочего пространства (при силе тока 15 А длина дуги достигает всего 10 мм).

Чаще всего способом микроплазменной сварки выполняется соединение деталей малой толщины с отбортовкой (рис. 2.11).

Микроплазменная сварка применяется для соединения особо тонких элементов, исправления микродефектов (микротрещин, царапин, раковин) миниатюрных деталей, резки металлов и неметаллов, прецизионной наплавки. Малая площадь нагрева и незначительная ширина зоны термического влияния обеспечивают высокое качество сварки миниатюрных и высокоточных деталей: гофрированных трубок и мембран с арматурой, миниатюрных трубопроводов, полупроводниковых приборов, конденсаторов, терморпар.

2.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Особенности способа. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) основана на том, что нагрев осуществляется управляемым электронным лучом с использованием кинетической энергии электронов, движущихся в высоком вакууме с высокой скоростью. При бом-

бардировке электронами поверхности металла подавляющая часть их кинетической энергии превращается в теплоту, которая плавит металл.

Для сварки необходимо получить свободные электроны, сконцентрировать их и сообщить им большую скорость для увеличения их энергии, которая должна превратиться в теплоту при торможении в свариваемом металле.

Источником свободных электронов служит раскаленный металлический катод, эмитирующий (испускающий) электроны, которые ускоряются электрическим полем с высокой разностью потенциалов между катодом и анодом. Фокусировка (концентрация электронов) достигается с помощью кольцевых магнитных полей. Резкое торможение электронного потока происходит автоматически при внедрении электронов в металл. Электронный луч создается в специальном приборе — электронно-лучевой пушке (рис. 2.12), представляющей собой устройство, испускающее узкие электронные лучи с большой плотностью энергии.

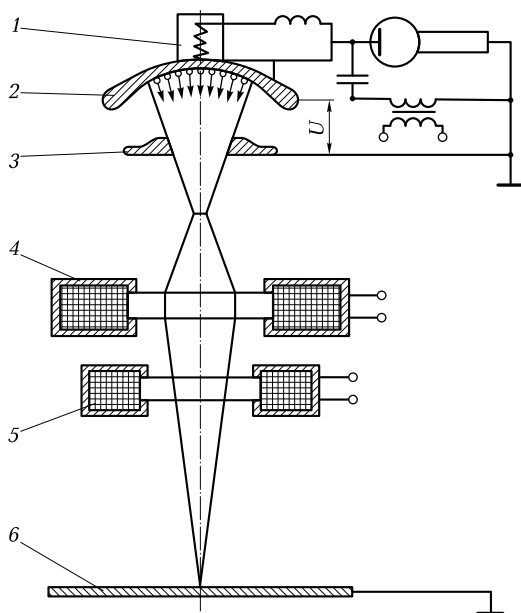


Рис. 2.12. Схема электронно-лучевой пушки:

1 — катод; 2 — прикатодный электрод; 3 — ускоряющий электрод (анод); 4 — фокусирующая магнитная линза; 5 — магнитная отклоняющая система; 6 — свариваемая деталь

Катод 1 пушки размещен внутри прикатодного электрода 2. На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод 3 (анод) с отверстием. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в луч (пучок) диаметром, равным диаметру отверстия в ускоряющем электроде (аноде). Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмитированные катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и соответствующую кинетическую энергию. После ускоряющего электрода электроны движутся с постоянной скоростью. Электрическая энергия сообщается пушке от высоковольтного источника постоянного тока. Электроны имеют одинаковый заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга, вследствие чего диаметр луча увеличивается, а плотность энергии в луче уменьшается.

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода из анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 4. Сфокусированные в плотный луч летящие электроны ударяются с большой скоростью о поверхность детали 6. При этом кинетическая энергия электронов вследствие торможения в веществе превращается в теплоту, нагревающую металл до высокой температуры.

Для перемещения луча по поверхности свариваемой детали на пути электронов помещается магнитная отклоняющая система 5, позволяющая направлять электронный луч точно по сварочному стыку.

Для обеспечения беспрепятственного движения электронов от катода к аноду и далее к свариваемой детали, для тепловой и химической изоляции катода, а также для предотвращения дугового разряда между электродами вакуумной системы установки создается высокий вакуум — не ниже $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па (или $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.).

Работа A , затраченная электрическим полем на перемещение заряда из одной точки в другую, равна произведению величины заряда (в данном случае — заряда e электрона) и разности потенциалов U между этими двумя точками, т. е. $A = eU$. Эта работа затрачивается на сообщение электрону кинетической энергии:

$$E = m_e v^2 / 2,$$

или

$$eU = m_e v^2 / 2,$$

где E — кинетическая энергия электрона; m_e — масса электрона; v — скорость движения электрона.

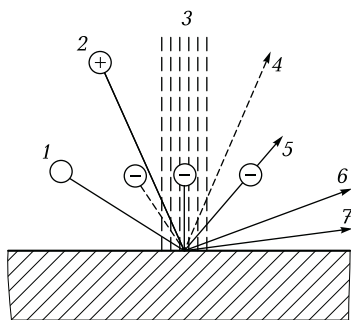


Рис. 2.13. Физическая картина явлений, сопровождающих проникновение электронов в металл: 1 — атомы металла; 2 — ионы; 3 — электронный луч; 4 — рентгеновское излучение; 5 — отраженные и вторичные электроны; 6 — тепловое и световое излучение; 7 — испарение металла

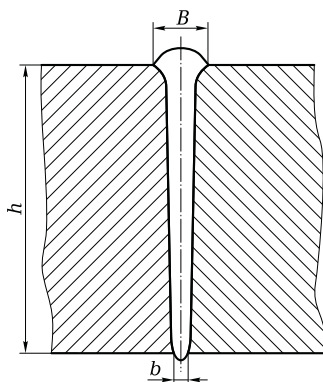


Рис. 2.14. Типичная форма сварного шва при электронно-лучевой сварке:
 h — глубина проплавления; B — ширина шва; b — ширина проплавления

Энергия электронов может достигать больших значений и зависит от разности потенциалов разгоняющего поля. В настоящее время эксплуатируются электронно-лучевые пушки с ускоряющим напряжением до 200 кВ.

Проникновение электронов в металл (рис. 2.13) сопровождается рентгеновским, тепловым и световым излучением, возникновением отраженных и вторичных электронов, испарением металла (атомов и ионов). Вторичные электроны подразделяются на три группы: упруго отраженные электроны, энергия которых примерно равна энергии падающих; электроны, отраженные в результате неупругого соударения и имеющие более или менее большие потери; собственно вторичные электроны, энергия которых не превышает 50 эВ.

Характерные значения параметров сварочных электронных лучей: минимальный радиус 0,1 ... 1 мм, энергия 10 ... 200 кэВ; мощность — до 120 кВт.

Плотность энергии в источнике нагрева является одной из основных его характеристик и определяет эффективный коэффициент использования теплоты, форму провара, размеры зоны термического влияния, сварочные деформации и повódки. Электронный луч — наиболее эффективный источник нагрева металла при сварке, поскольку плотность энергии в луче превышает плотность энергии электрической сварочной дуги более чем на три порядка.

При сварке электронным лучом формируется узкий и глубокий шов (рис. 2.14). Глубина h проплавления достигает 200... 400 мм, а отношение глубины проплавления к средней ширине шва составляет 20... 30.

Столь глубокое проникновение электронов в металл объясняется образованием в сварочной ванне канала практически на всю ее глубину. Основным фактором, вызывающим образование канала в жидком металле, является давление отдачи пара при испарении металла, поэтому канал в сварочной ванне называется пародинамическим.

Технология сварки. Режим ЭЛС определяется силой тока, ускоряющим напряжением, скоростью сварки, током фокусировки. Проплавающая способность электронного луча зависит в основном от ускоряющего напряжения и в меньшей мере от тока электронного луча. Ток в фокусирующей магнитной линзе влияет на размеры пятна нагрева и удельную тепловую энергию. Изменяя силу тока фокусировки, можно изменить ширину ванны и глубину проплавления.

Формирование сварного шва при электронно-лучевой сварке (рис. 2.15) имеет ряд особенностей, обусловленных испарением свариваемого материала и силовым воздействием давления отдачи пара на расплавленный металл. Давление этой отдачи на 3—5 порядков превышает давление электронного луча.

При определенном значении плотности и достаточной общей мощности электронного луча в сварочной ванне образуется

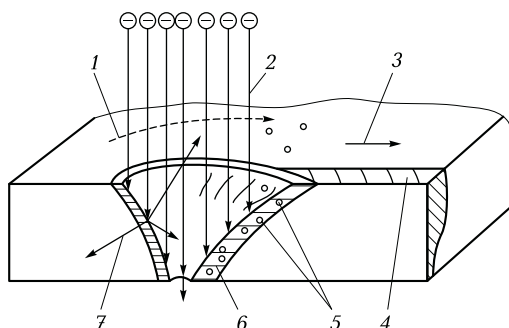


Рис. 2.15. Схема формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке:

1 — движение жидкого металла; 2 — электронный луч; 3 — направление движения свариваемой детали; 4 — сварной шов; 5 — пузырьки газа; 6 — жидкий металл; 7 — направление давления пара металла

канал-кратер, который может распространяться на всю толщину свариваемой детали так же, как и при сварке лучом лазера. Перемещение свариваемой детали или электронного луча приводит к периодическому переносу жидкого металла из зоны плавления в зону кристаллизации при непрерывном воздействии электронного луча на металл. Образование кратера на всю глубину проплавления позволяет получить исключительно малый объем сварочной ванны и минимальные деформации свариваемых деталей. Высокие скорости сварки обеспечивают минимальное термическое воздействие на материал свариваемой детали в околошовной зоне, а высокие скорости кристаллизации при эффективном теплоотводе — высокие механические свойства сварного соединения.

Высокие скорости электронно-лучевой сварки могут привести к подрезам, размеры которых определяются теплофизическими свойствами металла свариваемой детали. При этом в середине шва образуется выступ. Снижение скорости сварки минимизирует возможность образования подрезов. Если они все же образовались, то их можно устранить повторным оплавлением поверхности шва лучом меньшей мощности или расфокусированным лучом.

Одним из характерных дефектов ЭЛС является газовая пористость металла шва. Основная причина образования пор — загрязненность металла свариваемой детали газами, которые при кристаллизации сварочной ванны могут выделяться вследствие разной их растворимости в жидком и твердом металле. Пористости способствует также химическое взаимодействие компонентов и примесей в металле при высокой температуре с образованием газовой фазы. Высокая скорость кристаллизации металла ванны при ЭЛС не позволяет газовым пузырькам всплыть и выделиться из сварочной ванны. Лучшим способом борьбы с газовой пористостью при ЭЛС является использование чистых исходных металлов, получаемых вакуумно-дуговым, электрошлаковым и электронно-лучевым переплавом.

К числу наиболее важных технологических параметров относятся также тип и геометрия стыкового соединения, пространственное положение сварного шва и электронного луча. Однопроходной ЭЛС выполняются соединения разных типов (рис. 2.16).

Для тонколистовых деталей сварка проникающим лучом допускается в нижнем положении, а для деталей малой и средней толщины — в горизонтальном положении.

На практике применяется несколько технологических схем ЭЛС (рис. 2.17):

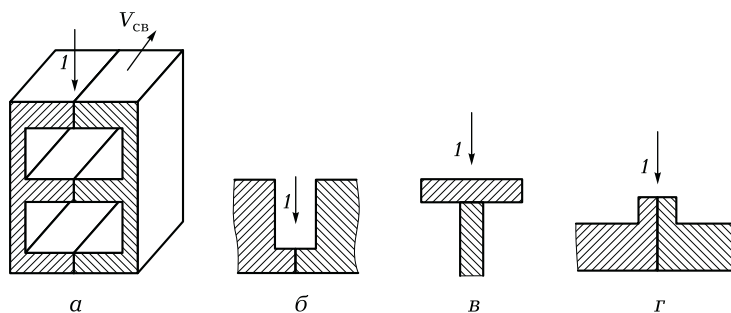


Рис. 2.16. Типы сварных соединений, выполняемых способом электронно-лучевой сварки:

а — стыковое соединение деталей с тремя стыкуемыми поверхностями, расположенными на разных уровнях (свариваются одновременно одним проникающим электронным лучом); *б* — стыковое соединение деталей с углублениями и труднодоступными местами; *в* — тавровое соединение (сваривается через полку); *г* — стыковое соединение с отбортовкой полок; *1* — электронный луч; $V_{св}$ — направление сварки

- в нижнем положении вертикальным электронным лучом без подкладки или на подкладке;
- «на подъем» и на боку горизонтальным электронным лучом без подкладки; для предотвращения вытекания жидкого металла из сварочной ванны иногда устанавливается ограничительная планка вдоль нижней кромки стыка;
- в потолочном положении; используется для соединения деталей малой толщины (как правило, до 20 мм) и применяется редко.

Особенности подготовки деталей и их свариваемых поверхностей обусловлены в основном спецификой источника теплоты

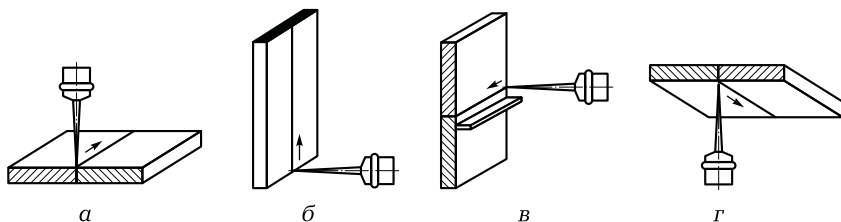


Рис. 2.17. Основные технологические схемы ЭЛС:

а — в нижнем положении вертикальным электронным лучом; *б* — «на подъем» горизонтальным электронным лучом; *в* — на боку горизонтальным электронным лучом с ограничительной планкой вдоль нижней кромки стыка; *г* — в потолочном положении

(узкого потока электронов), а также тем, что сварка выполняется в вакууме.

Высокое качество сварного шва требует очистки внешних и внутренних стыкуемых поверхностей от средств консервации, загрязнений, ржавчины и оксидных пленок. Предварительная очистка выполняется механически, а окончательная — физико-химическими способами, выбор которых зависит от металла свариваемой детали и шероховатости очищаемой поверхности. В некоторых случаях непосредственно перед сваркой внешняя поверхность свариваемых деталей в области стыка и стыкуемые поверхности (насколько позволяет ширина зазора в стыке) очищаются маломощным сканирующим электронным лучом. При этом луч должен лишь незначительно оплавливать очищаемую поверхность, не заплавляя зазор в стыке. Очистка выполняется за 1—2 прохода.

Однопроходная ЭЛС не требует разделки кромок. В то же время к ширине зазора в стыке предъявляются определенные требования: она должна быть меньше средних поперечных размеров электронного луча. Оптимальная величина зазора в стыке зависит от материала детали и ее толщины, типа стыка, пространственного положения стыка и электронного луча, а также от типа электронной пушки. Для ЭЛС без присадки металла при толщине детали 20...30 мм зазор, как правило, составляет 0,1...0,2 мм, а при толщине свыше 30 мм — примерно 0,3 мм. Чем хуже свариваемость металла и выше требования к допустимой деформации, тем более высокие требования предъявляются к точности зазора.

Разделка кромок соединяемых деталей применяется лишь в самых необходимых случаях для улучшения формы шва и обеспечения надежной работы систем автоматического слежения за стыком. Например, для предотвращения или уменьшения усиления либо уширения верхней части шва применяется V- или U-образная разделка кромок; для исключения обратного валика шва в нижней части стыка иногда выполняется П- или Л-образная разделка.

В зависимости от требований, предъявляемых к сварному соединению и сварной конструкции в целом, свойств материала конструкции и типа соединения при ЭЛС применяются специальные технологические приемы:

- полное проплавление свариваемого стыка. Этот наиболее надежный и простой прием позволяет исключить корневые дефекты, свести к минимуму угловые деформации, уменьшить вероятность образования пор и раковин благодаря улучшению условий дегазации металла сварочной ванны;

- развертка электронного луча (пучка). Широко используются такие развертки луча, как продольная, поперечная, Х-образная, по окружности, эллипсу, дуге. Благодаря развертке при сварке деталей большой толщины удается резко расширить диаметр и повысить устойчивость канала в сварочной ванне, что благоприятно сказывается на стабильности процесса формирования шва: уменьшается разбрызгивание расплавленного металла, предотвращается вытекание расплава из ванны при сварке горизонтальным лучом, уменьшается склонность к образованию трещин, корневых дефектов и протяженных полостей. Без применения развертки практически невозможно избежать этих дефектов при сварке деталей большой толщины, так как весьма сложно точно направить узкий луч по глубокому стыку при большой протяженности шва;
- сварка наклонным электронным лучом. Для сварки деталей большой толщины рекомендуется постоянное отклонение электронного луча на $5 \dots 7^\circ$ в направлении его перемещения по свариваемой детали. Этот прием позволяет значительно уменьшить пористость и несплошность;
- импульсная модуляция тока электронного луча. Этот прием применяется для уменьшения тепловложения и снижения вероятности образования трещин при сварке тонких листов (до 1 мм). Частота импульсов и скорость сварки выбираются с учетом перекрытия отдельными проплавленными участками друг друга;
- сварка с присадкой. Этот прием используется достаточно широко для исправления дефектов шва при больших зазорах в стыке, а также для легирования металла шва. В качестве присадки могут применяться проволока, лента, гранулы, а также проставка из листового металла (помещается встык);
- двухсторонняя сварка. Суть приема заключается в последовательной или одновременной сварке двух противоположных сторон стыка с глубиной проплавления, равной половине толщины стыка. Этот прием обеспечивает возможность сварки деталей с более толстыми стенками, чем позволяет имеющаяся аппаратура, а также позволяет избежать дефектов шва, вероятность появления которых возрастает с увеличением глубины проплавления;

- использование выводных планок при сварке начала и конца продольного шва. Этот прием позволяет получить качественный шов на этих участках, что без его использования затруднительно из-за быстрого нарастания и спада мощности электронного луча и вызванного этим образования аномально большого усиления шва и кратера.

Электронно-лучевая сварка обладает серьезными преимуществами по сравнению с другими способами сварки:

- возможность соединения за один проход деталей из металлов и сплавов толщиной 0,1 ... 400 мм, что является самым широким диапазоном среди всех методов сварки;
- малая протяженность зоны термического влияния при относительно небольшом снижении свойств в ней благодаря высокой концентрации энергии в луче, минимальному вводу теплоты и высокой скорости охлаждения сварного соединения. Особое значение это имеет при сварке конструкций из аустенитной стали, сплавов циркония, молибдена и других металлов, склонных при нагреве к значительному росту зерна и снижению коррозионной стойкости;
- высокая скорость кристаллизации металла малой по объему сварочной ванны и достижение мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам мало отличающегося от основного металла. Это преимущество обусловлено глубоким проплавлением металла при малой погонной энергии и высокой скоростью отвода теплоты из зоны сварки;
- возможность во много раз уменьшить деформации деталей по сравнению с дуговой сваркой, что обусловлено вводом значительно меньшего количества теплоты, особенно при импульсном режиме сварки;
- возможность использования электронного луча при сварке в узкую щель (когда методы дуговой сварки неприменимы) благодаря большой концентрации энергии в малом поперечном сечении луча и переносу энергии лучом на значительное расстояние от катода;
- возможность изменения в широких пределах рабочего расстояния от электронной пушки до свариваемой детали без существенного изменения параметров шва: 50 ... 120 мм для низковольтных пушек и 50 ... 500 мм — для

высоковольтных. При этом изменение рабочего расстояния на 1...5 мм в процессе сварки не оказывает существенного влияния на качество соединения;

- эффективная защита металла от взаимодействия с газами в процессе сварки, проводимой в условиях высокого вакуума;
- возможность перемещения электронного луча по сложным контурам с использованием программы ЭВМ. Эта возможность связана с тем, что отклонение потока электронов в магнитном поле осуществляется практически безынерционно;
- существенно (в 8—10 раз) сниженные энергетические затраты по сравнению с другими способами дуговой сварки;
- рациональность соединений деталей из тугоплавких металлов; деталей из термически упрочненных металлов, когда нежелательна, затруднена или невозможна последующая термообработка; деталей после окончательной механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций; конструкций ответственного назначения при значительной их толщине.

Недостатки способа ЭЛС следующие:

- сложность и высокая стоимость оборудования;
- необходимость использования вакуумных камер, что ограничивает размеры свариваемых деталей;
- вредное рентгеновское излучение в процессе сварки;
- необходимость высококвалифицированного персонала.

2.3. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

Особенности способа. При облучении поверхности тела светом энергия квантов (порций) света поглощается этой поверхностью. Образуется теплота, и температура поверхности повышается. Если световую энергию сконцентрировать на малом участке поверхности, то можно получить высокую температуру. На этом основана сварка световым лучом оптического квантового генератора — лазера.

Термин «лазер» происходит от первых букв английской фразы «Light amplification by the stimulated emission of radiation», что

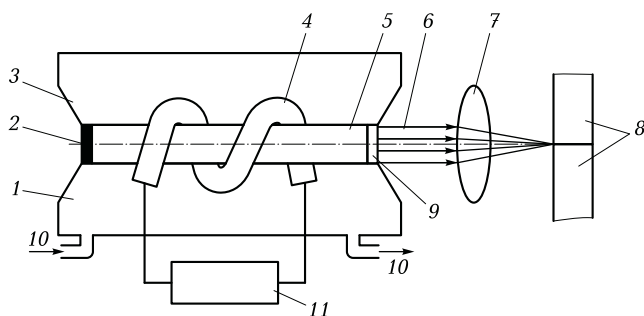


Рис. 2.18. Схема твердотельного лазера:

1 — охлаждающая среда; 2 — непрозрачное зеркало; 3 — отражатель; 4 — генератор накачки; 5 — рубиновый стержень [активная среда]; 6 — световой луч; 7 — фокусирующая линза; 8 — свариваемые детали; 9 — полупрозрачное зеркало; 10 — входное и выходное отверстия для воды, охлаждающей активную среду; 11 — источник питания

в переводе означает «Усиление света посредством индуцирования эмиссии излучения».

Основные элементы лазера: генератор накачки и активная среда. По активным средам лазеры подразделяются на твердотельные, газовые и полупроводниковые.

В твердотельных лазерах (рис. 2.18) в качестве активной среды чаще всего применяются стержни из розового рубина — оксида алюминия Al_2O_3 с примесью ионов хрома Cr^{3+} (до 0,05 %). При облучении ионы хрома переходят в другое энергетическое состояние — возбуждаются и затем отдают запасенную энергию в виде света. На торцы рубинового стержня нанесен слой отражающего вещества (например, серебра), так что с одного конца образуется непрозрачное, а с другого — полупрозрачное зеркало. Излучение ионов хрома, отражаясь от этих зеркал, циркулирует параллельно оптической оси стержня, возбуждая новые ионы, т. е. идет лавинообразный процесс. Происходит бурное выделение лучистой энергии, которая излучается параллельным лучом через полупрозрачное зеркало и фокусируется линзой в зоне сварки. Выходная мощность твердотельных лазеров достигает 10^7 Вт при сечении луча менее 1 см^2 . В фокусе достигается громадная концентрация энергии, позволяющая получать температуру до $1\,000\,000 \text{ }^\circ\text{C}$.

При работе в импульсном режиме твердотельный лазер имеет низкий КПД (0,01 ... 2 %). Более высокую мощность и больший КПД обеспечивают твердотельные лазеры, работающие в непрерывном режиме, например лазеры на алюмоиттриевом гранате, активированном атомами неодима (примерно 1 %).

Высокие КПД и мощность имеют газовые лазеры. В качестве активной среды в них чаще всего применяются CO_2 или смесь газов, генераторами накачки могут служить искровые разрядники или электронный луч.

Газовый лазер (рис. 2.19) представляет собой заполненную газом (или смесью газов) разрядную трубку, ограниченную с двух сторон строго параллельными зеркалами: непрозрачным и полупрозрачным. В результате электрического разряда между введенными в разрядную трубку электродами возникают быстрые электроны, которые возбуждают газовые молекулы. Возвращаясь в стабильное состояние, эти молекулы образуют кванты света так же, как и в твердотельном лазере.

Твердотельные и газовые лазеры могут работать в непрерывном и импульсном режиме.

Лазерная сварка производится на воздухе или в среде защитных газов: аргона, CO_2 . Вакуум, как при электронно-лучевой сварке, здесь не нужен, поэтому лазерным лучом можно сваривать крупногабаритные конструкции. Лазерный луч удобно управляется и регулируется. С помощью зеркальной оптической системы он легко транспортируется и направляется в труднодоступные места, где сварка другими способами затруднена или невозможна.

В отличие от электронного луча и электрической дуги на него не влияют магнитные поля, что обеспечивает стабильное формирование шва. Из-за высокой концентрации энергии (в пятне диаметром 0,1 мм и менее) в процессе лазерной сварки сохраняются небольшой объем сварочной ванны, малая ширина зоны термиче-

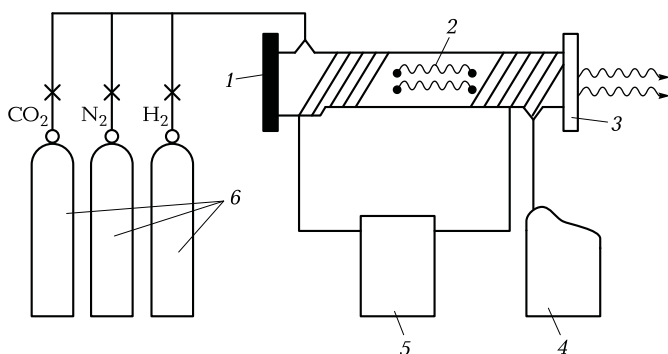


Рис. 2.19. Схема газового лазера:

1 — непрозрачное зеркало; 2 — разрядная трубка; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — вакуумный насос; 5 — источник питания; 6 — баллоны с технологическими газами

ского влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения. Это обеспечивает высокую технологическую прочность сварных соединений и отсутствие больших деформаций сварных конструкций. Например, лазерная сварка вилки с карданным валом автомобиля по сравнению с дуговой сваркой увеличивает срок службы карданной передачи в три раза за счет более чем вдвое уменьшенной площади сечения сварного шва и в несколько раз — времени сварки. Деформации вилки, вызывающие преждевременный износ, практически отсутствуют.

Основными энергетическими характеристиками процесса лазерной сварки являются плотность E мощности лазерного излучения и длительность t его действия. При работе лазера в непрерывном режиме длительность его действия определяется продолжительностью времени экспонирования, а при работе в импульсном режиме — длительностью импульса. Превышение верхнего предела E вызывает интенсивное объемное кипение и испарение металла, приводящее к выбросам металла и дефектам шва. На практике лазерная сварка выполняется при $E = 10^6 \dots 10^7$ Вт/см². При $E < 10^5$ Вт/см² лазерное излучение теряет свое основное преимущество — высокую концентрацию энергии. Изменение E и t позволяет сваривать лазерным лучом различные конструкции из элементов толщиной от нескольких микрометров до десятков миллиметров.

Скорость лазерной сварки в непрерывном режиме в несколько раз превышает скорости традиционных способов сварки плавлением. Например, стальной лист толщиной 20 мм электрической дугой сваривается со скоростью 15 м/ч за 5—8 проходов, при этом ширина шва составляет 20 мм; непрерывным лазерным лучом такой лист сваривается со скоростью 100 м/ч за 1 проход, при этом ширина шва составляет 5 мм. Однако скорость лазерной сварки в импульсном режиме сопоставима со скоростью традиционных способов сварки плавлением.

Технология сварки. Лазерную сварку можно производить со сквозным и с частичным проплавлением. Сварные швы одинаково хорошо формируются в любом пространственном положении. При сварке деталей с глубоким проплавлением с толщиной кромок менее 0,1 мм и деталей большой толщины формирование шва происходит по-разному, и поэтому подходы к выбору параметров режима сварки также различны. При сварке деталей малой толщины как в непрерывном, так и в импульсном режиме необходимы более «мягкие» параметры режима сварки, обеспечивающие лишь расплавление металла в стыке деталей без его перегрева до температуры интенсивного испарения. В этом случае сварка деталей из ста-

лей и других относительно малоактивных металлов может выполняться без дополнительной защиты зоны нагрева, что существенно упрощает технологию, тогда как сварка с глубоким проплавлением ведется с защитой шва газом, состав которого подбирается в зависимости от материала свариваемой детали.

Основными параметрами режима импульсной лазерной сварки являются энергия и длительность импульса, диаметр сфокусированного излучения, частота следования импульсов, положение фокального пятна относительно поверхности свариваемых деталей. Длительность лазерного импульса должна соответствовать тепловой постоянной времени τ для данного материала, приближенно определяемой по формуле

$$\tau = \delta^2 / (4a), \quad (2.3)$$

где δ , a — толщина и коэффициент температуропроводности материала свариваемой детали соответственно.

Значения τ для деталей малой толщины (при $\delta = 0,1 \dots 0,2$ мм) составляют несколько миллисекунд. На этом основании длительность импульса нужно выбирать для деталей из меди $0,0001 \dots 0,0005$ с, из алюминия — $0,0005 \dots 0,002$ с, из сталей — $0,005 \dots 0,008$ с. При увеличении δ на 1 мм и более τ возрастает и может значительно превосходить достижимую длительность лазерных импульсов. Поэтому лазерная сварка деталей толщиной более 1 мм импульсным излучением затруднена.

Диаметр d сфокусированного излучения определяет площадь нагрева и плотность мощности E . При сварке диаметр d путем расфокусировки луча можно изменять в диапазоне $0,05 \dots 1$ мм. При этом фокальная плоскость, на которой сфокусированный световой луч имеет наименьший диаметр, располагается выше или ниже поверхности свариваемых деталей.

При сварке в импульсном режиме сварной шов образуется наложением сварных точек с их взаимным перекрытием на $30 \dots 90$ % в зависимости от типа сварного соединения и требований к нему. Промышленные сварочные установки с твердотельными лазерами позволяют вести сварку направленным швом со скоростью до 5 мм/с при частоте импульсов до 20 Гц. Для сварки можно использовать присадочный материал в виде проволоки диаметром менее 1,5 мм, ленты или порошка. При использовании присадочного материала увеличивается сечение шва, что позволяет избежать наиболее распространенного дефекта — ослабления шва, и обеспечивает возможность легирования металла шва. Легирующие элементы при лазерной сварке можно наносить предварительно

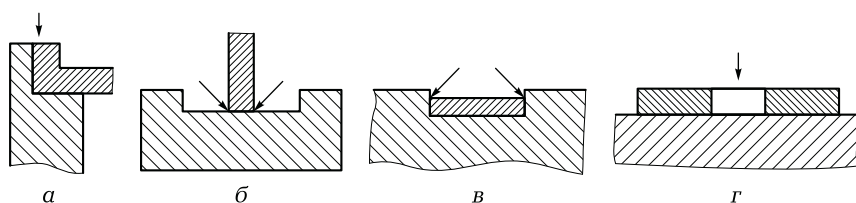


Рис. 2.20. Сварные соединения деталей разной толщины:

а — по борту массивной детали и отбортовке тонкой детали; *б* — тавровое соединение; *в* — по кромке выточки в массивной детали; *г* — точечное соединение; стрелками показано направление лазерного луча

на поверхности свариваемых кромок напылением, обмазкой, электроискровым способом.

Лазерная сварка в импульсном режиме получила наиболее широкое распространение в электронной и электротехнической промышленности, где необходимо сваривать угловые, нахлесточные и стыковые соединения тонкостенных деталей. Хорошее качество соединений обеспечивает сварка лазерным лучом деталей разной толщины (рис. 2.20). В этом случае в процессе сварки луч смещается на более массивную деталь, выравнивая температурное поле и обеспечивая равномерное проплавление обеих деталей. Чтобы уравновесить условия нагрева и плавления таких деталей, толщину массивной детали в месте стыка следует уменьшить, выполнив на ней борт, а на детали малой толщины — технологическую отбортовку или выточку.

При лазерной сварке нагрев и плавление металла происходят так быстро, что тонкая кромка не успевает деформироваться до того, как металл затвердевает. Это позволяет сваривать детали малой толщины и массивные детали внахлестку. Для этого необходимо, чтобы при плавлении кромки детали малой толщины и борта массивной детали образовалась общая сварочная ванна. Это возможно при сварке по кромке отверстия или по периметру детали малой толщины.

Детали малой толщины можно сваривать также газовыми и твердотельными лазерами непрерывного действия мощностью до $1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Наиболее качественный шов формируется при стыковом соединении деталей малой толщины. Однако при сборке таких соединений под лазерную сварку предъявляются более жесткие требования: минимальный и равномерный зазор в стыке и практически полное отсутствие смещения кромок.

Сложнее формируется шов при сварке с глубоким проплавлением деталей толщиной более 1 мм. Как только плотность мощности

лазерного излучения превысит критическую, нагрев металла будет происходить со скоростью, значительно превышающей скорость отвода теплоты в основной металл за счет теплопроводности. На поверхности жидкого металла под действием реакции его паров образуется углубление, которое, увеличиваясь, формирует канал, заполненный паром и окруженный жидким металлом. Давление пара оказывается достаточным для противодействия силам гидростатического давления и поверхностного натяжения, что позволяет полости канала не заполниться жидким металлом. При определенной скорости сварки форма канала приобретает динамическую устойчивость. На его передней стенке происходит плавление металла, на задней — затвердевание. Наличие канала способствует поглощению лазерного излучения не только на поверхности, но и в глубине свариваемой детали. Формируется так называемое кинжальное проплавление. При этом образуется узкий шов с большим соотношением глубины проплавления и ширины шва.

При лазерной сварке сварочная ванна (рис. 2.21) имеет характерную форму: она вытянута в направлении сварки. В головной части ванны расположен парогазовый канал (кратер) 3 — область наиболее яркого свечения. На передней стенке канала существует слой расплавленного металла, испытывающий постоянные возмущения. Здесь наблюдается характерное искривление передней стенки кратера в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. При перемещении этой ступеньки сверху вниз расплавленный металл с нее удаляется.

Перенос расплавленного металла из головной части ванны в хвостовую происходит по боковым стенкам в горизонтальном направлении. В хвостовой части 4 ванны расплавленный металл завихряющимися потоками поднимается вверх и частично выносит-

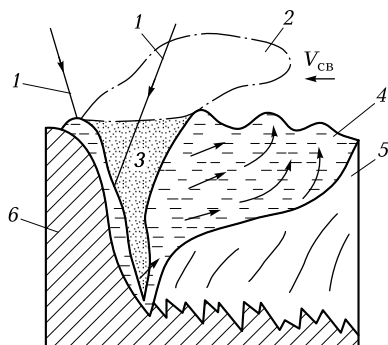


Рис. 2.21. Продольное сечение сварочной ванны при лазерной сварке:

1 — границы лазерного луча; 2 — плазменный факел; 3 — парогазовый канал (кратер); 4 — хвостовая часть ванны; 5 — сварной шов; 6 — свариваемая деталь; $V_{св}$ — направление сварки

ся на поверхность сварочной ванны. При образовании канала 3 над поверхностью металла появляется светящийся факел 2, состоящий из продуктов испарения, мелких выбрасываемых из ванны капель металла и частиц конденсированного пара. При значительной скорости сварки факел отклоняется на $20 \dots 60^\circ$ в сторону, противоположную направлению сварки, поглощает часть энергии луча и снижает его проплавляющую способность.

При сварке деталей толщиной более 1 мм на проплавляющую способность луча в первую очередь влияет мощность излучения. Поскольку сварка таких деталей ведется при непрерывном излучении, то к основным параметрам режима здесь относится и скорость сварки. При выбранном значении мощности излучения скорость сварки определяется исходя из особенностей формирования шва: минимальное значение скорости ограничено отсутствием «кинжального проплавления», а максимальное — образованием пор, непроваров и других дефектов формирования шва. Скорость сварки может достигать $90 \dots 310$ м/ч.

На качество сварных швов влияет фокусировка луча. Для сварки луч фокусируют в пятно диаметром $0,5 \dots 1$ мм. При меньшем диаметре повышенная плотность мощности приводит к перегреву расплавленного металла и усилению его испарения, тогда появляются дефекты шва. При большем диаметре снижается эффективность сварки. Формирование шва зависит также от положения фокальной плоскости относительно поверхностей свариваемых деталей. Максимальная глубина проплавления достигается при расположении фокуса луча над поверхностью детали.

Форма кратера сварочной ванны в продольном сечении (рис. 2.22) отличается от его формы при дуговой сварке. На поверхности фронта кристаллизации имеется выступ, который делит ванну на две части. Нижняя часть значительно заглублена и имеет малую протяженность в поперечном сечении, тогда как верхняя часть более широкая и вытянута вдоль шва. Это свидетельствует о том, что при лазерной сварке одновременно имеют место два процес-

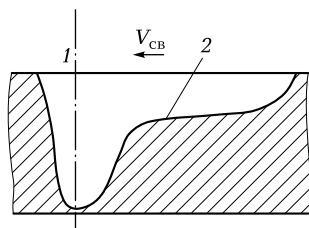


Рис. 2.22. Продольное сечение кратера сварочной ванны:

1 — ось лазерного луча; 2 — выступ на поверхности фронта кристаллизации

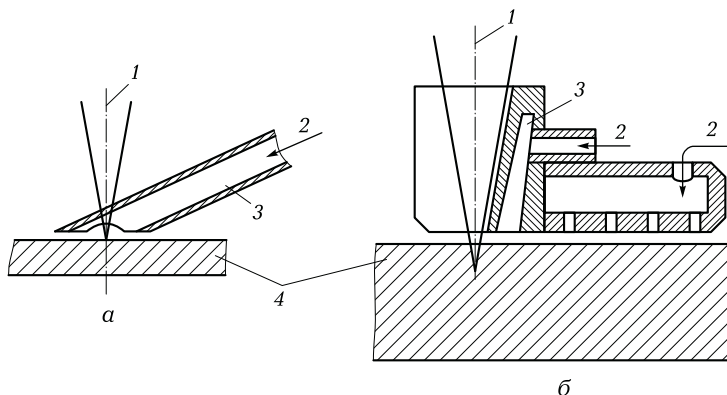


Рис. 2.23. Схемы защитных сопел для сварки деталей малой толщины (а) и сварки с глубоким проплавлением (б):

1 — лазерные лучи; 2 — защитный газ; 3 — сопло; 4 — свариваемые детали

са проплавления металла. Первый процесс связан с образованием канала (см. рис. 2.21). Именно этот процесс обеспечивает эффект «кинжального проплавления». Второй процесс — поверхностное плавление за счет теплопроводности материала свариваемой детали. Преимущественное развитие того или иного процесса зависит от параметров режима сварки и определяет очертания кратера сварочной ванны.

Высокая концентрация энергии и скорость лазерной сварки по сравнению с дуговой, незначительное тепловое воздействие на околошовную зону вследствие высокой скорости нагрева и охлаждения металла способствуют существенному повышению сопротивляемости большинства конструкционных материалов, образованию горячих и холодных трещин. Это обеспечивает высокое качество сварных соединений из материалов, плохо свариваемых другими способами сварки. Существенно (до десяти раз) уменьшается величина деформаций сваренных деталей, что снижает затраты на правку.

При лазерной сварке деталей малой толщины, а также при сварке с глубоким проплавлением защитный газ, подаваемый через сопло в зону сварки, защищает металл шва от окисления. Для этого применяются специальные защитные сопла (рис. 2.23).

При сварке конструкций из алюминия, титана и других высокоактивных металлов требуется дополнительная защита корня шва. В этих случаях в качестве защитных используются те же газы, что и при дуговой сварке: чаще всего аргон, гелий или их смеси. За-

щитные газы влияют на эффективность проплавления: чем выше потенциал ионизации и теплопроводность газа, тем больше эффективность проплавления. Надежная защита обеспечивается при расходе гелия $0,0005 \dots 0,0006 \text{ м}^3/\text{с}$, аргона — $0,00015 \dots 0,0002 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для защиты зоны лазерной сварки можно использовать флюсы такого же состава, что и при дуговой сварке. Они применяются в виде обмазок, наносимых на свариваемые кромки.

Наиболее часто встречающиеся дефекты при лазерной сварке деталей большой толщины — неравномерность проплавления корня шва и наличие полостей в шве. Для снижения вероятности образования пиков проплавления при сварке с несковозным проплавлением рекомендуется повышать скорость сварки и отклонять лазерный луч от вертикали на $15 \dots 17^\circ$ по направлению движения луча. При сварке со сквозным проплавлением неравномерности проплава позволяют избежать остающиеся или удаляемые подкладки.

Эффективность лазерной сварки можно повысить увеличением проплавающей способности луча. Перспективным в этом смысле является применение импульсных режимов сварки: при частоте импульсов $0,4 \dots 1 \text{ кГц}$ и длительности импульсов $20 \dots 50 \text{ мс}$ глубину проплавления можно увеличить в 3—4 раза по сравнению со сваркой в непрерывном режиме. КПД луча при сварке в импульсном режиме в 2—3 раза выше, чем в непрерывном. Однако сварка в импульсном режиме требует очень точной наводки луча на свариваемый стык и очень высокого качества подготовки кромок к сварке, а ее скорость в несколько раз уступает скорости сварки в непрерывном режиме.

Другой путь повышения эффективности — это подача в зону сварки дополнительного потока газа под давлением. Глубина проплавления при этом увеличится, но чрезмерное повышение расхода газа легко приводит к ухудшению появления в металле шва пор, раковин, свищей. В какой-то момент газ начинает выдувать жидкий металл и сварка переходит в резку.

При сварке с несковозным проплавлением применяется способ импульсной подачи дополнительного газа. Это способствует повышению глубины проплавления на $30 \dots 40 \%$, стабилизации проплава.

Эффективность лазерной сварки можно повысить введением в зону сварки химических элементов, способствующих ионизации газа и снижающих экранирующее действие факела. Это достигается нанесением на поверхности свариваемых кромок покрытий, содержащих элементы с низким потенциалом ионизации (калий, натрий).

Расширение области применения лазерной сварки сдерживается экономическими соображениями. Стоимость технологических лазеров пока еще высока, что требует тщательного обоснования необходимости применения лазерной сварки. Однако, если применение традиционных способов не дает желаемых результатов либо технически неосуществимо, то можно рекомендовать лазерную сварку. К таким случаям относится необходимость получения прецизионной (высокоточной) конструкции, изменение формы и размеров которой в результате сварки не допускается. Лазерная сварка целесообразна также в тех случаях, когда она позволяет значительно упростить технологию изготовления сварных изделий, является заключительной операцией и не требует последующей правки или механической обработки. Экономически эффективна лазерная сварка там, где необходимо существенно повысить производительность, поскольку ее скорость может быть в несколько раз выше, чем скорость сварки традиционными способами.

При изготовлении крупногабаритных конструкций малой жесткости или с труднодоступными швами, а также при необходимости соединения деталей из трудносвариваемых (в том числе разнородных) материалов лазерная сварка может оказаться единственным способом сварки, обеспечивающим качественные сварные соединения.

2.4. СВАРКА СВЕТОВЫМ ЛУЧОМ

В установках для сварки световым лучом можно использовать такие источники излучения, как угольная дуга, дуговые газоразрядные лампы и лампы накаливания. Наиболее перспективны и удобны для технологического использования дуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления и кварцевые галогенные лампы накаливания (трубчатые галогенные лампы накаливания).

Дуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления — это мощные высокоинтенсивные источники излучения, создающие световой луч с наиболее высокими энергетическими параметрами. Лампы выполнены в виде шарового баллона из прозрачного кварца, в котором расположены два вольфрамовых электрода. Баллоны ламп заполнены ксеноном под давлением 4...10 атм (или 0,4...1 МН/м²). При работе лампы давление в ней возрастает до 10...30 атм (или 1...3 МН/м²), дуговой разряд сильно сжимается, образуя высококонцентрированный источник лучистой энергии. Температура разряда у катода достигает 12 000 °С. Ксеноновые лампы экономичнее

ламп накаливания. Большая часть энергии, подведенная к ксеноновой лампе (50...60%), преобразуется разрядом в излучение, состоящее из 10% излучения в ультрафиолетовой области спектра, 35% — в видимой и 55% — в инфракрасной. Спектр излучения ксеноновых ламп близок по составу к спектру солнечного света и лежит в интервале длин волн 0,2...2,4 мкм. Такое излучение более эффективно для нагрева металлов, чем излучение ламп накаливания, так как коротковолновая часть спектра лучше поглощается такими материалами. Электропитание ксеноновых ламп осуществляется от источников постоянного тока с напряжением холостого хода не ниже 70 В и падающей внешней вольт-амперной характеристикой. Дуговой разряд в ксеноновой лампе возбуждается с помощью высоковольтного высокочастотного блока поджига (осциллятора). Лампы могут работать в непрерывном режиме в течение сотен часов.

С точки зрения использования в установках для сварки наибольший интерес представляют лампы марки ДКСР с комбинированным охлаждением, которые благодаря разборному вводу достаточно компактны при относительно высокой мощности (3...10 кВт).

Кварцевые галогенные лампы накаливания являются простыми, компактными и долговечными источниками лучистой энергии и состоят из кварцевой трубчатой колбы, заполненной инертным газом с добавками йода, в которой расположена вольфрамовая спираль. Электропитание таких ламп осуществляется переменным током промышленной частоты, поэтому они не нуждаются в сложных источниках питания. Некоторые типы ламп рассчитаны на непосредственное включение в сеть. При высокой температуре реализуется регенеративный йодный цикл, который увеличивает срок службы лампы до 2500...5000 ч за счет уменьшения испарения вольфрама со спирали и запыления колбы парами вольфрама. Галогенные лампы накаливания большую часть лучевой энергии излучают в инфракрасной области спектра (60...80%), в видимой — только 10...14%. Спектр излучения кварцевых галогенных ламп накаливания характеризуется интервалом длин волн 0,5...3,8 мкм.

Сравнительно низкая интенсивность излучения, его спектральный состав ограничивают применение кварцевых галогенных ламп для термической обработки сварных соединений.

Для фокусировки излучения источников света при сварке применяются различные оптические системы (рис. 2.24), из которых наиболее перспективны системы на основе эллипсоидных отражателей: они просты по конструкции и обеспечивают выход светового луча за пределы системы. В многоэллипсоидной системе источник излучения помещается в ближнее фокусное расстояние отража-

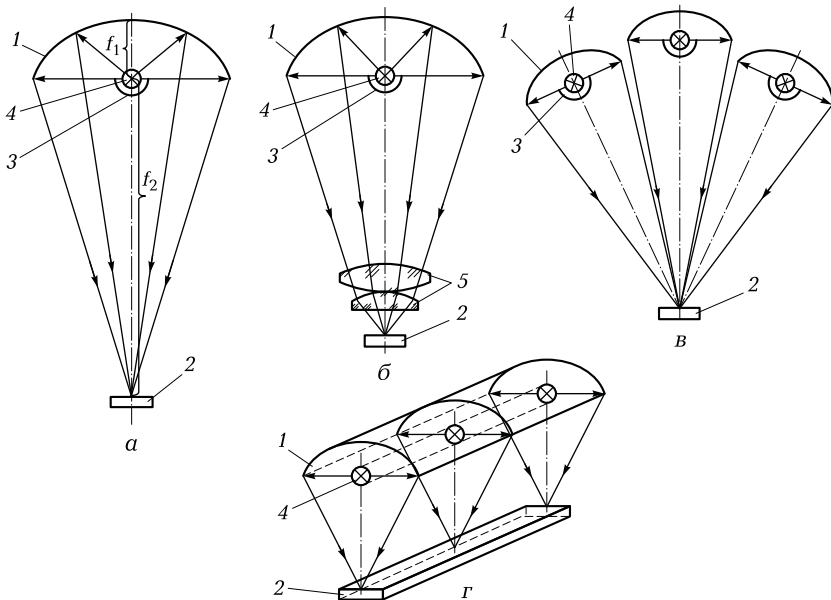


Рис. 2.24. Оптические системы фокусировки излучения источников света, применяемые в установках для сварки световым лучом:

a — моноэллипсоидная; *б* — моноэллипсоидная с линзовым объективом; *в* — полиэллипсоидная; *г* — цилиндрическая [эллиптический цилиндр]; 1 — отражатель; 2 — объект нагрева; 3 — контротражатель; 4 — источник излучения; 5 — линзовый объектив; f_1 , f_2 — ближнее и дальнее фокусное расстояние отражателя

теля, а его излучение собирается в дальнем фокусном расстоянии, где и расположен нагреваемый объект. Отражатели изготавливаются из стекла или металла с последующим нанесением покрытия из золота, серебра или алюминия.

Для повышения плотности лучистого потока, а также получения различных видов распределения лучистого потока в пятне нагрева используются комбинированные полиэллипсоидные системы, состоящие из нескольких отдельных моноэллипсоидных систем с излучателями.

Для фокусировки лучистого потока точечных излучателей, таких как дуговые ксеноновые лампы и кварцевые галогенные лампы накаливания с компактным телом накала, используются отражатели в форме эллипсоида вращения. При этом в рабочем фокусе возникает пятно нагрева в виде круга.

Фокусировка лучистого потока линейных излучателей, таких как трубчатые галогенные лампы накаливания, происходит с по-

мощью отражателей в форме эллиптического цилиндра. При этом в плоскости рабочего фокуса возникает пятно нагрева в виде полосы.

При сварке световым лучом в большинстве случаев необходима защита нагретого материала соединения от взаимодействия с атмосферой. В зависимости от конкретной технологической задачи применяются различные схемы защиты: общая защита в камере или местная защита в потоке инертного газа с использованием накладной камеры или сопловых насадок.

При выборе оптимальных параметров режима сварки тонколистовых деталей в пределах области возможных параметров следует исходить из условий хорошего получения швов минимальной ширины и полного их проплавления.

Прочность полученных сварных соединений из стали 12Х18Н10Т в широком диапазоне изменения погонной энергии колеблется в пределах 82...92 % прочности основного металла, а сварных соединений из стали Ст3 и титанового сплава ОТ4 — на уровне прочности основного металла.

Благодаря устойчивости сварочной ванны к образованию прожога при сварке световым лучом в ряде случаев требования к сборке свариваемых кромок могут быть менее жесткими, чем при других способах сварки. В частности, при сварке световым лучом деталей толщиной 0,5 мм из титанового сплава ОТ4 местные зазоры до 0,2 мм и превышение кромок до 0,25 мм не приводят к образованию прожога.

При сварке световым лучом деталей из алюминиевых сплавов возникают затруднения, связанные с необходимостью разрушения и удаления оксидной пленки, низким коэффициентом поглощения и высокой теплопроводностью этих материалов.

В результате исследований установлено, что успешное решение задачи сварки деталей из алюминиевых сплавов может быть достигнуто при использовании покрытий на основе графита и специальных флюсов с оптическими добавками, увеличивающими коэффициент поглощения.

При нанесении покрытия увеличивается коэффициент поглощения и усиливается деформация кромок в процессе нагрева, что приводит к нарушению сплошности оксидной пленки, выдавливанию и слиянию расплавленного металла через возникшие в пленке трещины с образованием общей сварочной ванны. Механические испытания показали, что сварные соединения из алюминиевого сплава АМг3, полученные по этой технологии, обладают достаточно высокими прочностными и пластическими свойствами.

Помимо стыковых соединений световым лучом можно успешно сваривать бортовые и нахлесточные соединения тонколистовых конструкций как в непрерывном, так и в импульсном режиме при использовании прерывателей лучистого потока.

Одна из важнейших технологических особенностей сварки световым лучом по сравнению с другими способами электрической сварки — возможность сварки конструкций из неметаллических материалов (стекла, керамики, пластмасс). В настоящее время еще не все возможности этого способа сварки исследованы. Однако уже имеются положительные результаты при решении ряда конкретных технологических задач. Так, световым лучом дуговых ксеноновых ламп успешно сваривается шлакоситалловое стекло, которое ранее считалось несвариваемым. Лучистая энергия кварцевых ламп накаливания в строительной отрасли успешно применяется для сварки поливинилхлоридного линолеума.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются преимущества сжатой дуги по сравнению со свободной дугой?
2. Чем отличается сжатая дуга прямого действия от сжатой дуги косвенного действия?
3. Как происходит возбуждение сжатой дуги прямого действия?
4. Почему напряжение сжатой дуги выше напряжения свободной дуги?
5. Почему при сварке сжатой дугой получаются более узкие швы, чем при сварке свободной дугой?
6. Как протекает процесс сварки «в замочную скважину»?
7. Какое явление ограничивает возможности сжатой дуги?
8. Какие требования к стыку деталей предъявляются при плазменной сварке?
9. Какими параметрами можно регулировать давление сжатой дуги?
10. Какими параметрами можно регулировать тепловой поток от сжатой дуги к свариваемой детали?
11. Что такое микроплазменная сварка?
12. В каких случаях используется микроплазменная сварка?
13. Что такое электронно-лучевая сварка?
14. В чем заключаются особенности и преимущества ЭЛС по сравнению с другими способами сварки?
15. Как возникают свободные электроны в электронно-лучевых пушках и от чего зависит плотность тока эмиссии?
16. Какова скорость движения электронов и от чего она зависит?

17. Что такое средняя длина пробега молекул остаточного газа и какова ее величина в установках для ЭЛС?
18. На какую глубину электрон проникает в обрабатываемый материал и от чего эта глубина зависит?
19. Куда расходуется энергия электронного луча при сварке?
20. Какие силовые воздействия формирует кратер в сварочной ванне при ЭЛС?
21. Какие требования предъявляются к подготовке кромок и сборке соединений для ЭЛС?
22. Перечислите основные типы соединений, применяемых при ЭЛС.
23. Каковы особенности лазерного луча как источника энергии?
24. В чем заключаются преимущества лазерной сварки по сравнению с другими способами сварки плавлением?
25. Какие лазеры используются для сварки металлов?
26. Каковы основные энергетические характеристики лазерной сварки?
27. За счет чего обеспечивается высокая точность конструкций, изготовленных с применением лазерной сварки?
28. Почему выгодны малые размеры швов, получаемых при лазерной сварке?
29. Какие виды проплавления возникают при лазерной сварке?
30. В каких случаях выполняется лазерная сварка с глубоким проплавлением?
31. В каких случаях применяется лазерная сварка с небольшим проплавлением?
32. В чем состоит характерная особенность сварного соединения при лазерной сварке?
33. Где применяется лазерная сварка в импульсном режиме?
34. Как легируется сварной шов при лазерной сварке?
35. Какие технологические приемы применяются при лазерной сварке деталей разной толщины?
36. В чем состоит принципиальное отличие лазерной сварки с глубоким проплавлением от сварки деталей малой толщины?
37. Как влияет фокусировка лазерного луча на качество соединений?
38. Когда достигается максимальная глубина проплавления при лазерной сварке?
39. Какие процессы проплавления происходят при лазерной сварке?
40. Какие специфические особенности лазерной сварки влияют на склонность сварных соединений к образованию трещин?
41. Как можно защитить металл шва от окисления при лазерной сварке?
42. Какие дефекты характерны для сварных соединений, полученных лазерной сваркой?

43. Каковы пути повышения эффективности лазерной сварки?
44. Как увеличить глубину проплавления при лазерной сварке?
45. Зачем перед лазерной сваркой на поверхность свариваемых кромок наносят специальные покрытия?
46. Где и почему рекомендуется применять лазерную сварку вместо традиционных способов сварки плавлением?

КОНТАКТНАЯ СВАРКА

3.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Особенности способа. Контактная сварка — это процесс образования неразъемного сварного соединения путем нагрева металла проходящим через него электрическим током и пластической деформации зоны соединения под действием сжимающего усилия.

Родоначальник контактной сварки — английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин), который в 1856 г. впервые применил стыковую сварку, а в 1877 г. в США она была внедрена в промышленность. В том же году в России Н. Н. Бенардос предложил технологию контактной точечной и шовной (роликовой) сварки. В СССР контактная сварка была поставлена на промышленную основу в 1936 г. после освоения серийного выпуска контактных сварочных машин. В настоящее время контактная сварка преимущественно применяется в серийном и массовом производстве машино- и авиастроения.

С помощью контактной сварки изготавливается до 90 % конструкций, свариваемых давлением, и примерно 50 % всех сварных конструкций. Это объясняется преимуществами контактной сварки по сравнению с другими способами: высокой производительностью (время сварки одной точки или стыка составляет 0,02... 1 с), малым расходом вспомогательных материалов, высоким качеством и надежностью сварных соединений при небольшом числе управляемых параметров режима, что снижает требования к квалификации сварщика. Контактная сварка — экологически чистый процесс, легко поддающийся механизации и автоматизации.

Недостатками контактной сварки можно считать относительную сложность оборудования и недостоверность (в ряде случаев), трудность неразрушающего контроля сварных соединений.

В зависимости от вида сварного соединения контактная сварка подразделяется на точечную (в частности, рельефную), шовную (роликовую) и стыковую (рис. 3.1).

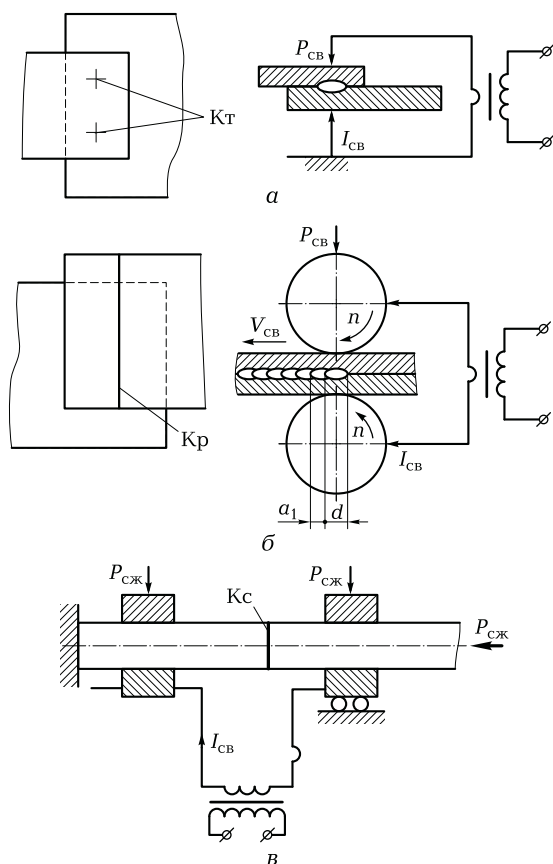


Рис. 3.1. Схемы способов контактной сварки:

a — точечная (Кт); *б* — шовная (Кр); *в* — стыковая (Кс); $P_{сж}$ — усилие сжатия; $P_{св}$ — усилие сжатия электродов при сварке; $I_{св}$ — сила сварочного тока; n — частота вращения роликов; $V_{св}$ — скорость сварки; a_1 — шаг сварных точек; d — диаметр сварной точки

Сварочные электроды. При контактной сварке электроды служат для замыкания вторичного контура через свариваемые детали. При шовной сварке электроды-ролики перемещают свариваемые детали и удерживают их в процессе нагрева и осадки.

Важнейшая характеристика электродов — стойкость, способность сохранять исходную форму, размеры и свойства при нагреве рабочей поверхности до температуры $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ударных усилиях сжатия до 50 МПа . Электроды для точечной сварки являются быстроизнашивающимся сменным инструментом сварочной ма-

шины. Для изготовления электродов используются медь и жаропрочные медные сплавы — бронзы (хромоциркониевая БрХЦрА, кадмиевая БрКд1, хромистая БрХ, легированная никелем, титаном и бериллием БрНТБ, кремний-никелевая БрКН-1-4). Бронзы БрНТБ и БрКН-1-4 обладают повышенной износостойкостью, из них можно изготавливать электроды-губки стыковых машин.

Материалы для электродов должны обладать также высокой электро- и теплопроводностью, чтобы их нагрев в процессе сварки был минимальным. Температура разупрочнения бронз не превышает 0,5 их температуры плавления, а рабочая поверхность электрода нагревается до $0,6T_{пл}$. При таких условиях электродные бронзы относительно быстро разупрочняются.

Повысить износостойкость электродов можно за счет технологических факторов. Сварку алюминиевых и магниевых сплавов лучше производить на конденсаторных машинах, а не на машинах переменного тока. Вместо механической зачистки необходима химическая очистка поверхности, травление и пассивация.

Для точечной сварки производят электроды двух видов (рис. 3.2). Расстояние l от рабочей поверхности электрода до дна охлаждающего канала не должно превышать 10 ... 12 мм, увеличение его до 15 мм повыша-

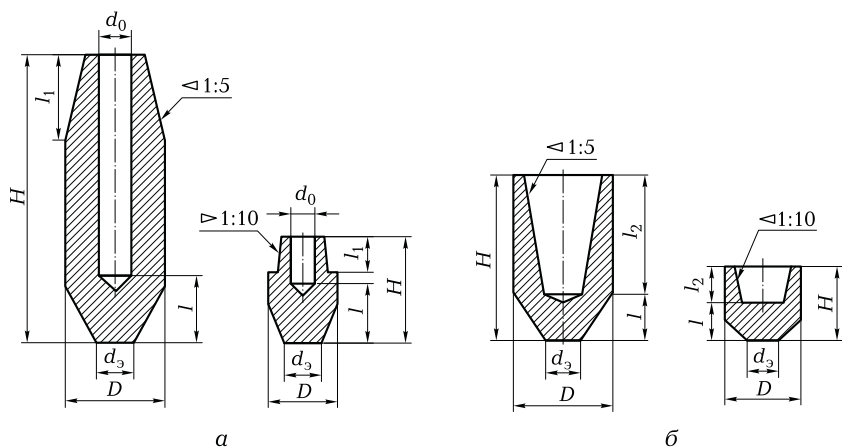


Рис. 3.2. Электроды для точечной сварки:

а — с наружным посадочным конусом; *б* — колпачковый (с внутренним посадочным конусом); D — внешний диаметр электрода; d_0 — внутренний диаметр электрода (диаметр канала для охлаждающей воды); d_3 — диаметр рабочей поверхности электрода; l — расстояние от рабочей поверхности электрода до канала для охлаждающей воды; l_1 — длина посадочного конуса электрода; l_2 — длина канала для охлаждающей воды; H — высота электрода

ет износ электрода в два раза. При сварке конструкций из черных металлов стойкость электродов можно повысить в 3—4 раза только за счет сферической заточки электрода и снижения темпа сварки до 40—60 точек в минуту.

Форма и размеры электродов для точечной сварки регламентируются ГОСТ 14111—69. Электрод должен иметь минимальную массу, удобно и надежно устанавливаться на сварочной машине. Наружный диаметр D должен обеспечивать устойчивость электрода против изгиба при сжатии его усилием сварки, а также возможность захвата инструментом при снятии. Внутренний диаметр d_0 должен обеспечивать ввод трубки с охлаждающей водой и выход воды, обычно $d_0 = 8$ мм. Длина конусной части для крепления электрода в свече машины $l_1 < 1,2D$. Угол конусности 1 : 10 при $D < 25$ мм и 1 : 5 при $D > 32$ мм. Диаметр d_3 рабочей части электрода выбирается в зависимости от толщины кромок свариваемых деталей: $d_3 = 3s$.

Стойкость электродов с наружным посадочным конусом обычно не превышает 20 000 сварок. Стойкость колпачковых электродов (с внутренним посадочным конусом) достигает 100 000 сварок вследствие лучших условий охлаждения. Для сварки в труднодоступных местах деталей сложной конфигурации применяются фигурные электроды.

Форма электрода для точечной рельефной сварки конструктивно приближается к форме свариваемой детали. В простейшем случае электрод представляет собой плиту с плоской рабочей поверхностью.

Электроды-ролики шовных машин имеют форму дисков. Ширина B рабочей поверхности ролика и его толщина H зависят от толщины s свариваемой детали: $B = 2s + 2$ мм, $H = 2B$. Диаметр верхнего ролика составляет 100... 400 мм, нижнего — 100... 200 мм. Рабочая поверхность электрода для сварки деталей из легких сплавов — сферическая, с радиусом 25... 100 мм.

Подготовка деталей к сварке и сборка. При подготовке деталей к контактной сварке (для всех ее разновидностей) должны выполняться три основных требования:

- минимальное электрическое сопротивление в контакте электрод—деталь;
- одинаковое сопротивление по всей площади контакта деталь—деталь;
- совпадение поверхностей свариваемых деталей по сопрягаемым стыкам.

Выбор конкретного вида подготовки поверхностей к сварке определяется материалом деталей, исходным состоянием их поверхностей, типом производства (единичное, мелкосерийное, крупносерийное или массовое). В единичном и мелкосерийном производстве необходимо предусмотреть операции правки, рихтовки, обезжиривания, травления или зачистки, механической обработки. В крупносерийном и массовом производстве, в заготовительном и штампопрессовом цехах которых обеспечивается высокое качество исходных деталей, подготовку поверхностей проводить необязательно. Исключение составляют детали из алюминиевых сплавов, требующих обработки поверхности не ранее чем за 10 ч до сварки.

Критерием качества подготовки поверхности к сварке является величина сопротивлений контактов электрод—деталь ($R_{э-д}$) и деталь—деталь ($R_{д-д}$). Сопротивление измеряется микроомметром с помощью щупа на детали, зажатой между электродами бесшовной сварочной машины, без включения сварочного тока. Для стальных деталей сопротивление более 200 мкОм свидетельствует о плохом качестве поверхности. Высокое $R_{э-д}$ приводит к перегреву электродов и подплавлению поверхности деталей, вследствие чего происходит наружный и внутренний выплеск металла и образуется чрезмерная вмятина под электродами.

Точность деталей обеспечивает сборка в приспособлениях: универсальных (в единичном и мелкосерийном производстве) или специальных (в крупносерийном и массовом производстве). Для фиксации деталей используются их технологические отверстия, выступы, рельефы. Детали прихватываются в приспособлениях и окончательно свариваются в свободном состоянии. Иногда в приспособлениях выполняется весь процесс сварки. Приспособления должны обеспечивать свободный доступ электродов к месту прихватки и сварки, быстрое и надежное закрепление деталей, точность сборки и неизменность параметров режима сварки. Первые прихватки следует располагать в местах высокой жесткости, остальные — от середины к краям.

Общие режимы сварки. К основным параметрам режима всех способов контактной сварки относятся сила сварочного тока, длительность его импульса и усилие сжатия деталей. Теплота в металле свариваемой детали выделяется при прохождении через него импульса тока $I_{св}$ длительностью τ (в соответствие с законом Джоуля—Ленца):

$$Q = I_{св}^2 R_{св} \tau. \quad (3.1)$$

За $R_{св}$ в приведенной формуле принято сопротивление столбика металла между электродами; при расчете силы сварочного тока длительность импульса сварочного трансформатора $R_{св}$ является исходным параметром, так как его легко рассчитать, зная материал детали, ее толщину и необходимую температуру сварки. При этом сопротивлениями в контактах деталь — деталь и электрод — деталь пренебрегают.

Согласно закону Джоуля — Ленца с увеличением $R_{св}$ должно увеличиться количество выделяющейся теплоты. Но по закону Ома

$$I_{св} = U_2 / Z, \quad (3.2)$$

где U_2 — напряжение на вторичном контуре сварочной машины; Z — полное сопротивление вторичного контура, в которое входит $R_{св}$. Поэтому при увеличении $R_{св}$ уменьшится $I_{св}$, который входит в формулу (3.1) как $I_{св}^2$.

Следовательно, увеличение $R_{св}$ не всегда приводит к увеличению количества выделяющейся при сварке теплоты, а многое зависит от соотношения $R_{св}$ и полного сопротивления вторичного контура сварочной машины. Отсюда следуют несколько практических выводов:

- с ростом общего сопротивления вторичного контура от 50 до 500 мкОм тепловыделение в зоне сварки уменьшается по мере падения $R_{св}$ в 10 раз;
- недостаток теплоты компенсируется увеличением мощности (U_2) или времени сварки;
- сварка на контактных машинах с малым сопротивлением вторичного контура (примерно 50 мкОм) сопровождается интенсивным ростом нагрева по мере падения $R_{св}$ в процессе увеличения сварного ядра. При достижении равенства $R_{св} = Z$ нагрев достигает максимума, а затем, по мере еще большего снижения $R_{св}$ (по достижении требуемого размера ядра), уменьшается. Таким образом, сварка на контактных машинах с малым сопротивлением вторичного контура (а их большинство) сопровождается нестационарным нагревом и нестабильным качеством соединений. Есть два варианта снижения негативного влияния этого фактора: надежным сжатием зачищенных деталей, обеспечивающим поддержание $R_{св}$ на минимальном уровне; поддержанием высокого уровня $R_{св}$ за счет слабого сжатия деталей и разделения импульса сварочного тока на несколько коротких импульсов. Второй вариант позволяет еще и сэкономить энергию и обе-

спечивает прецизионное соединение с остаточной деформацией 2... 5%.

При сварке на машинах с сопротивлением вторичного контура более 500 мкОм снижение $R_{св}$ в процессе сварки практически не влияет на выделение теплоты. Нагрев остается стационарным, что характерно для сварки на подвесных машинах с длинным кабелем во вторичном контуре. Сваренные на таких машинах соединения обладают стабильным качеством.

Закон Джоуля—Ленца графически изображается гиперболой. Если учесть допустимый по ГОСТ 15878—74 уровень проплавления в пределах (0,2... 0,8)s, то весь диапазон параметров режимов точечной сварки можно изобразить двумя гиперболами (рис. 3.3): верхней, ограничивающей проплавление на уровне 0,8s, и нижней— 0,2s. Из графика видно, что в процессе контактной сварки в зависимости от выбранных параметров режима можно попасть в одну из трех характерных областей: область полного непровара (Н); область провара (П), где глубина проплавления может находиться в пределах 20... 80 % толщины детали; область сварки с выплесками (Вп).

В области П можно выделить три зоны параметров режимов ABC , $BCDE$ и DEF .

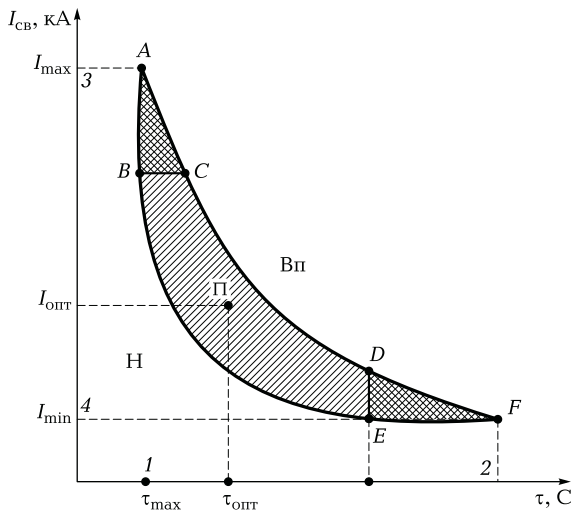


Рис. 3.3. Зависимость глубины проплавления при контактной точечной и шовной сварке от соотношения силы $I_{св}$ сварочного тока и длительности τ импульса:

A, B, C, D, E, F — точки, ограничивающие зоны параметров режимов сварки; Н, П, Вп — область полного непровара, провара и сварки с выплесками соответственно

Зона *ABC* характеризуется большой силой сварочного тока и малым временем его протекания. Такие режимы называются жесткими. Здесь на глубину проплавления влияет практически только время сварки. Увеличение силы тока более чем на 20 % от точки *B* чревато бесполезной затратой энергии и не приводит к увеличению провара. Эта зона составляет 20 % от общей области *П*.

Зона *BCDE* характеризуется оптимальными (средними) параметрами режима, при которых на глубину проплавления влияет изменение силы тока и времени сварки. Эта зона составляет 60 % от общей области *П*.

Зона *DEF* составляет 20 % от общей области *П* и характеризуется относительно малой силой тока и большой длительностью импульса. Такие режимы называются мягкими. Глубину проплавления здесь можно регулировать только за счет изменения силы тока в очень узком диапазоне его значений. Повышение времени сварки в этой зоне не увеличивает проплавление и размеры ядра точки, но может перегреть металл ядра. Точки *1* и *2* показывают минимально и максимально допустимое время сварки деталей данной толщины из данных материалов при максимальной и минимальной силе тока, соответствующей точкам *3* и *4*.

Сила сварочного тока $I_{св}$, длительность импульса τ и усилие P сжатия деталей при точечной сварке выбираются в зависимости от толщины s свариваемой детали. При жестких режимах $I_{св} = 10\,000\text{с}$, $\tau = 0,08\text{с}$, $P = 250\text{с}$; при мягких режимах $I_{св} = 6\,000\text{с}$, $\tau = 0,2\text{с}$, $P = 100\text{с}$. Чаще применяют промежуточные значения параметров. При последовательной сварке нескольких точек необходимо увеличивать силу тока с учетом его шунтирования (утечки через ранее сваренные точки).

3.2. ШОВНАЯ СВАРКА

Шовная сварка (роликовая) выполняется на деталях, собранных внахлестку и зажатых между электродами-роликами (см. рис. 3.1, б). Ролики, изготовленные из медных сплавов, в процессе сварки вращаются, перемещая свариваемые детали. Импульсы сварочного тока следуют один за другим с заданной паузой между ними. Совокупность взаимно перекрывающихся точек образует сплошной сварной шов.

В случае затрудненного доступа к обратной стороне детали или при необходимости повышения производительности шовную сварку можно выполнять с односторонним подводом сварочного тока,

установив оба электрода с одной стороны детали. С обратной стороны детали устанавливается медная подкладка. Свариваются одновременно два шва.

Размеры точки определяются шириной или радиусом закругления рабочей части электрода (ролика) и скоростью перемещения детали. Обычно точка имеет удлиненную форму (см. рис. 3.1, б). Шаг сварных точек a_1 и диаметр d точки связаны зависимостью: для получения плотного шва $a_1 = (0,5 \dots 0,6)d$; при $a_1 > d$ шов получается неплотным. При соотношении толщины свариваемых деталей более 2:1 ухудшаются условия формирования шва.

Подготовка деталей к шовной сварке производится в соответствии с общими требованиями. Однако к очистке поверхности детали предъявляются более жесткие требования, поскольку плохая очистка увеличивает шунтирование, что снижает качество соединения. Не допускаются большие зазоры, ведущие к прожогам и продавливанию нагретого металла.

Шаг прихватки составляет 70...150 мм, при выполнении герметичных швов он уменьшается до 40...60 мм. Прихватку ведут по осевой линии шва; прихватка в стороне от шва допускается, если сварная конструкция не несет вибрационной нагрузки. Для устранения зазоров и неплотностей, для сохранения постоянной величины нахлестки и отбортовки выполняются подгонка и правка.

Основными параметрами режима шовной сварки являются сила сварочного тока $I_{св}$, длительность импульса $t_{св}$, скорость сварки $V_{св}$, диаметр ролика D_0 , ширина b_0 рабочей поверхности или радиус закругления R_0 , усилие сжатия электродов P . Показатели режима связаны между собой. При шовной сварке применяются мягкие и жесткие режимы.

Сила сварочного тока выбирается в зависимости от вида металла, толщины свариваемой детали и скорости сварки. Для одного и того же металла свариваемой детали сила тока при шовной сварке на 20...50 % выше, чем при точечной. Детали из низкоуглеродистых сталей свариваются при силе сварочного тока 8...24 кА; детали из закаленных низколегированных сталей — на токах до 20 кА; еще меньшие токи применяют для сварки деталей из аустенитных коррозионно-стойких сталей — на токах 4...18 кА.

Длительность паузы между импульсами тока должна быть равна длительности импульса в пределах (0,04...0,06)с, что обеспечивает перекрытие сварных точек в шве на 50 %. Усилие P сжатия принимается 300с. Скорость сварки обычно устанавливается 0,5...6 м/мин.

При выполнении продольных швов при сварке деталей из ферромагнитных сталей сила тока значительно меняется: по мере вве-

дения детали в сварочный контур сила тока уменьшается и в конце сварки становится недостаточной для провара. Это частично устраняют сваркой с двух сторон, сваркой участками при разной силе тока или регулированием силы тока в процессе сварки.

Длительность импульса и паузы и их соотношение зависят от свариваемого металла, силы сварочного тока и скорости сварки. Для деталей из низкоуглеродистых и коррозионно-стойких сталей ориентировочно принимается длительность паузы $t_{\text{п}} = (1,0 \dots 1,2)t_{\text{св}}$, для закаленных сталей $t_{\text{п}} = (0,5 \dots 0,8)t_{\text{св}}$, для деталей из алюминиевых сплавов $t_{\text{п}} = (1,5 \dots 2)t_{\text{св}}$. Детали из низкоуглеродистой стали с защитными покрытиями свариваются на жестких режимах (для сохранения покрытия). Для поддержания покрытия в расплавленном состоянии до образования каждой точки устанавливается малая длительность паузы (например, для деталей из оцинкованной стали $t_{\text{п}} = (0,25 \dots 0,3)t_{\text{св}}$).

Длительность импульса и паузы для сварки на машинах переменного тока устанавливается кратной периоду тока промышленной частоты (0,02 с).

Усилие сжатия электродов выбирается в зависимости от тех же условий, что и при точечной сварке. Величина усилия сжатия ограничивается конструкцией и стойкостью роликов и мощностью привода вращения. Для сварки деталей толщиной 1 ... 3 мм из низкоуглеродистой стали устанавливается усилие сжатия 3 000 ... 9 000 Н, деталей из аустенитной коррозионно-стойкой стали — 3 000 ... 13 000 Н, для деталей из алюминиевых сплавов — 3 500 ... 7 000 Н.

Скорость сварки связана с величиной шага точек и длительностью импульса тока и паузы.

У большинства шовных машин скорость сварки находится в пределах 0,5 ... 5 м/мин. У некоторых машин нижний и верхний пределы скорости сварки составляют 0,2 и 10 м/мин. Скорость шовностыковой сварки труб достигает 15 м/мин.

Размеры электродов (роликов) зависят от толщины и конструкции детали. Ролики диаметром 250 ... 300 мм хорошо охлаждаются, поэтому стойкость их высока; при диаметре роликов менее 150 мм их стойкость заметно снижается.

3.3. СТЫКОВАЯ СВАРКА

Стыковая сварка (см. рис. 3.1, в) состоит в соединении прутков, профильного проката или труб по всей площади их торцов. Детали зажимаются в электродах-губках, прижимаются друг к другу сое-

диняемыми поверхностями. Затем через место контакта деталей пропускается сварочный ток. Стыковая сварка может выполняться сопротивлением и непрерывным оплавлением.

Сварка сопротивлением применяется для соединения деталей с небольшой площадью поперечного сечения (до 250 мм²) и компактной формой сечения (круг, квадрат).

При сварке сопротивлением детали прижимаются друг к другу с большим усилием (2... 5 кгс/мм²). Сварочный ток нагревает детали до температуры, составляющей 0,8... 0,9 от температуры плавления. В стыке происходит пластическая деформация и соединение образуется без расплавления металла. Невозможность равномерного нагрева торцов препятствует выполнению сварки деталей развитого сечения (тонкий лист, тонкостенная труба, прокатный профиль). Сваренный стык имеет плавное усиление (утолщение) и, как правило, после сварки не обрабатывается.

Сварка непрерывным оплавлением применяется для соединения деталей компактного (до 1 000 мм²) и развитого сечений. Например, успешно свариваются листы шириной 2 000 мм и толщиной 1,5... 2 мм, т. е. с площадью торца 3 000... 4 000 мм². При условии программирования управления напряжением можно сваривать детали и большего сечения — до 10 000 мм².

При сварке непрерывным оплавлением детали прижимаются друг к другу малым усилием при включенном сварочном трансформаторе. Отдельные контакты поверхностей мгновенно оплавляются, возникают новые контакты, которые также оплавляются. Под действием электродинамических сил жидкие прослойки металла оплавленных контактов вместе с оксидами и загрязнениями выбрасываются из стыка деталей. Поверхности постепенно оплавляются, после чего усилие сжатия необходимо резко увеличить — происходит осадка. При этом через стык еще в течение 0,1 с пропускают ток. Жидкий металл вместе с оставшимися оксидами вытесняется из зоны стыка в грат — соединение образуется между твердыми, но пластичными поверхностями. При сварке оплавлением химически активных металлов зону соединения следует защищать инертными газами.

Образование сварного соединения при стыковой сварке происходит в результате нагрева торцов деталей и их пластической деформации усилием осадки. Характер формирования соединения, а вместе с этим прочность и другие его механические свойства зависят от состояния поверхностей торцов свариваемых деталей (вида обработки, температуры перед осадкой, наличия оксидных пленок и загрязнений), характера распределения температуры (теплофи-

зических свойств), величины и характера деформации торцов под действием усилия осадки.

Частично сгоревший металл, смешанный с расплавленным, образует в месте стыка выплеск (грат), который срезается после сварки.

В зоне, прилегающей к стыку, свойства металла изменяются в зависимости от характера термического и механического воздействия при сварке (от длительности и температуры нагрева, скорости и величины усилия осадки). Эти показатели можно регулировать в широких пределах, следовательно, можно получить металл околошовной зоны с заданными или близкими к ним свойствами.

Качество сварного соединения во многом определяется конструкцией свариваемых деталей. Конструкции деталей для стыковой сварки приведены на рис. 3.4. Рациональная конструкция обеспечивает равномерный нагрев обеих деталей. Нежелательная конструкция не гарантирует высокое качество стыка. Отклонения по диаметру или стороне квадрата в сечении детали допускаются в пределах 15 %, по толщине полосы, листа, стенки трубы — 10 %.

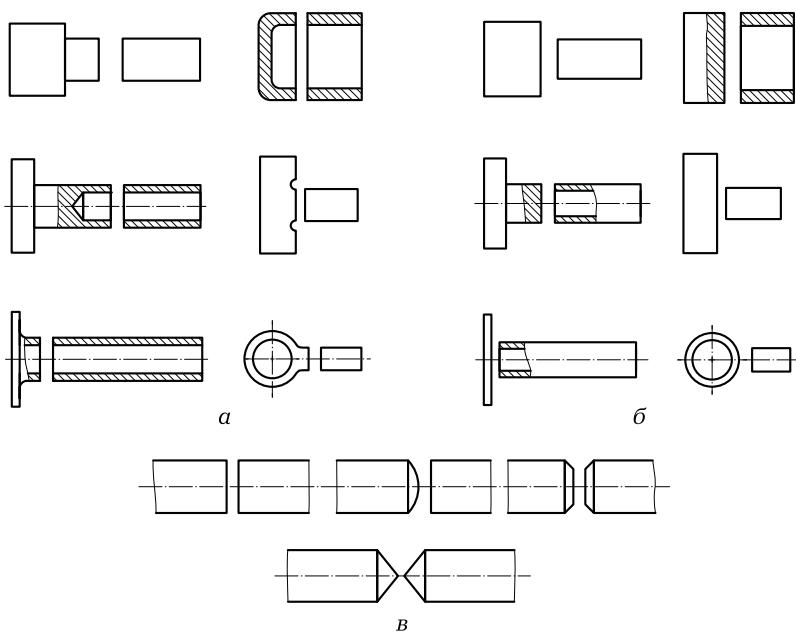


Рис. 3.4. Конструкции деталей для стыковой сварки:

а — рациональная; *б* — нежелательная; *в* — торцы прутков, подготовленных для сварки сопротивлением

При подготовке деталей к стыковой сварке необходимо обработать их торцы и очистить контактирующие поверхности.

Обработка торцов свариваемых деталей состоит в механической (на токарных, строгальных, фрезерных станках) и термической (кислородной, плазменной) резке с последующим удалением графа, шлака и окалины. Очистка контактирующих поверхностей состоит в механической обработке, травлении (с последующей нейтрализацией и промывкой), дробеструйной очистке, галтовке в барабанах (для мелких деталей). Сварка деталей с неочищенной контактирующей поверхностью ведет к повышенному износу электродов.

К параметрам режима контактной стыковой сварки оплавлением относятся напряжение U_2 холостого хода сварочного трансформатора, плотность j тока, скорость V_{oc} осадки, величина оплавления $l_{оп}$, величина осадки l_{oc} и вылет l каждой свариваемой детали из электродов (губок), т. е. расстояния от торца детали до электрода, в котором эта деталь зажата. Вылет деталей можно быть одинаковым, если свариваемые детали имеют одинаковое сечение и выполнены из одного металла. Если свариваются детали разных сечений или из разных металлов, то уменьшается вылет детали, нагрев которой должен быть меньше. Если мощность сварочной машины недостаточна, то стыковая сварка оплавлением ведется несколькими короткими импульсами или с предварительным подогревом детали. При стыковой сварке сопротивлением вместо скоростей оплавления и осадки принимаются величина осадки обеих деталей и усилие осадки.

При стыковой сварке (как и при всех прочих видах контактной сварки) применяются как жесткие режимы, характеризующиеся большой плотностью тока и малой продолжительностью сварки, так и мягкие — с малой плотностью тока и большой продолжительностью сварки. При сварке деталей с малой площадью сечения применяются жесткие режимы.

Таблица 3.1. Плотность тока и продолжительность сварки деталей с разной площадью сечения

Параметр	$S, \text{ мм}^2$					
	25	50	100	250	500	1 000
$j, \text{ А/мм}^2$	200	160	140	90	60	40
$t_{св}, \text{ с}$	0,6	0,8	1,0	1,5	2,5	4,5

Таблица 3.2. Плотность тока при сварке оплавлением и осадке деталей из некоторых металлов

Металл детали	$j_{оп}, \text{А/мм}^2$		$j_{ос}, \text{А/мм}^2$
	средняя	максимальная	
Сталь:			
низкоуглеродистая	5... 15	20... 30	40... 60
высоколегированная	10... 20	25... 35	35... 50
Сплавы:			
алюминиевые	15... 25	40... 60	70... 150
медные	20... 30	50... 80	100... 200
титановые	4... 10	15... 25	20... 40

Плотность тока и длительность его протекания при сварке деталей с разной площадью S сечения приведены в табл. 3.1.

Продолжительность сварки стержней из цветных металлов устанавливается в 2—3 раза больше приведенной в таблице.

Ориентировочные значения плотности тока при сварке оплавлением и осадке в зависимости от металла свариваемых деталей приведены в табл. 3.2.

Скорость оплавления выбирается с таким расчетом, чтобы процесс протекал устойчиво. При сварке с высокой производительностью на жестких режимах деталей из низкоуглеродистых сталей скорость оплавления составляет 4...6 мм/с. При большой продолжительности сварки оплавлением (при сварке деталей большого сечения) скорость оплавления снижается до 2...2,5 мм/с.

Скорость осадки должна быть в 10—15 раз выше скорости оплавления, что объясняется необходимостью быстрого удаления оксидов и перегретого металла из зоны стыка. Скорость осадки зависит от металла свариваемой детали: для низкоуглеродистой стали составляет 50...60 мм/с, для легированных сталей (в том числе хромистых и хромоникелевых) — 70...120 мм/с, для никелевых сплавов — 60 мм/с и более, для алюминия и его сплавов — более 150 мм/с, для меди и ее сплавов — 200 мм/с и более.

Давление осадки зависит от площади сечения, прочности металла свариваемых деталей, ширины зоны нагрева и степени разогрева концов деталей. Давление зависит также от характера режима сварки: при жестких режимах давление значительно выше, чем при мягких.

Обработка деталей после стыковой сварки состоит в термической обработке и удалении грата.

Термическая обработка выполняется в тех случаях, когда структура металла в процессе сварки изменяется и требует улучшения. В каждом отдельном случае режим термообработки задается в соответствии с химическим составом металла, необходимой твердостью и пластичностью.

Удаление грата с наружных поверхностей сварного соединения происходит механическим способом — он срезается на металлорежущих станках универсальным инструментом или специальными устройствами (гратоснимателями).

Удаление грата с внутренних поверхностей в прямолинейных трубах выполняется протяжкой с помощью нескольких кольцевых резцов или дорнов. В гнутых трубах для удаления грата используются специальные снаряды со сжатым воздухом; можно также удалить грат с продувкой трубы (пока стык не остыл) кислородом или кислородно-воздушной смесью; в процессе сварки возможно удаление грата продувкой трубы защитным газом.

3.4. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА

Точечная сварка является наиболее распространенной и состоит в соединении деталей на отдельных участках их соприкосновения — в точках (см. рис. 3.1, *a*). Детали собираются внахлестку, сжимаются между электродами из медных сплавов, подключенными ко вторичной обмотке сварочного трансформатора. Затем через зону сварки пропускается короткий импульс тока $I_{св}$. В месте контакта деталей металл расплавляется, образуется ядро сварной точки. Под действием сжимающего усилия происходит пластическая деформация металла, по периметру ядра образуется уплотняющий пояс, предохраняющий ядро от окисления и выплеска.

В случае затрудненного доступа к обратной стороне детали или при необходимости повышения производительности точечную сварку можно выполнять с односторонним подводом сварочного тока, устанавливая оба электрода с одной стороны детали. С обратной стороны устанавливается медная подкладка. Свариваются одновременно две точки.

Разновидность точечной сварки — рельефная сварка. Для ее выполнения на одной из деталей штампуется выступ-рельеф. На рельеф укладывается вторая деталь и выполняется сварка. Это обеспе-

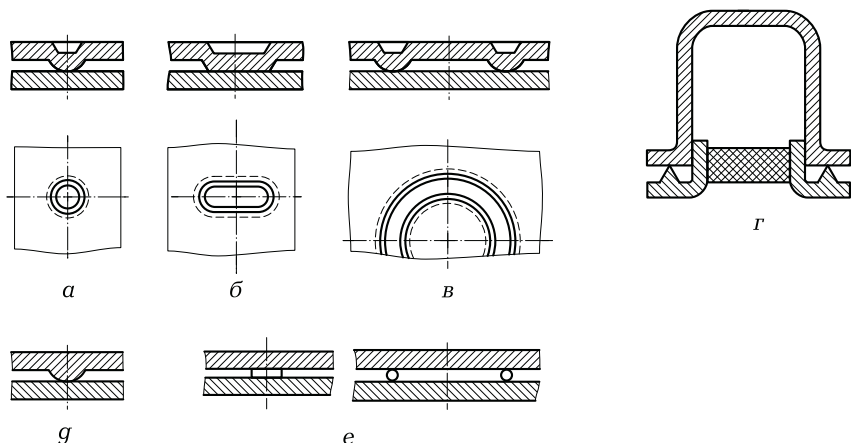


Рис. 3.5. Типы рельефов при рельефной сварке внахлестку:

а — сферический; *б* — овальный; *в* — кольцевой; *г* — кольцевой для герметичных соединений; *д* — сферический, образованный холодной высадкой; *е* — кольцевые вставки (концентраторы)

чивает более концентрированный нагрев в зоне контакта деталей. При образовании сварного ядра рельеф сминается. Рельеф можно штамповать в виде длинного бугорка-валика, тогда выполняется рельефная роликовая сварка.

Точечной сваркой выполняются только нахлесточные соединения, рельефной — нахлесточные и стыковые. Для этого с обеих сторон стыка листовых деталей накладываются полоски тонкой (0,3...0,5 мм) фольги из металла свариваемых деталей, и стык сваривается с полным проплавлением его толщины.

Рельефная сварка внахлестку выполняется по предварительно выполненным рельефам (рис. 3.5). Чаще всего используется сферический рельеф. Овальный рельеф удобен при небольшой ширине нахлестки и вытянутой форме детали. Кольцевые рельефы могут использоваться при сварке прочных и плотных соединений, позволяющих герметизировать небольшие корпуса (например, полупроводниковых приборов).

Рельефы размещаются на свариваемой детали большей толщины, причем после сварки на лицевой поверхности детали остается углубление в виде лунки или кольца. Если рельеф образован холодной высадкой (рис. 3.5, *г*) или для образования соединения применены вставки — концентраторы (рис. 3.5, *е*), то следа на лицевой поверхности детали после сварки не остается.

Сварные соединения, получаемые рельефной сваркой, подразделяются на две группы:

- соединения с образованием литого ядра, в результате нагрева и деформации сферических рельефов (как при точечной сварке). Форма, размеры и прочность соединения в этом случае зависят главным образом от формы и размеров рельефа. Равномерность распределения теплоты и одновременная деформация рельефов достигаются плавным нарастанием (модуляцией) силы сварочного тока, увеличением усилия сжатия и уменьшением массы и инерции подвижной контактной плиты и частей привода сварочной машины;
- соединения без образования литой зоны при пластичном состоянии металла, при сварке конструкций кольцевыми рельефами и Т-образными и крестообразными элементами.

Рельефная сварка успешно используется для соединения деталей из углеродистых и легированных сталей, но для соединения деталей из цветных металлов применяется редко.

Подготовка деталей к рельефной сварке состоит в очистке их поверхностей, правке, подгонке и сборке, которые выполняют так же, как и для точечной сварки. Особое значение имеет точность выполнения формирования рельефа по форме и размерам.

Основными параметрами режима рельефной сварки являются сила сварочного тока $I_{св}$, кА, или плотность тока j , А/мм²: $j = I_{св}/d_p$, где d_p — диаметр рельефа, мм; продолжительность сварки $t_{св}$, с; усилие сжатия электродов: при сварке $P_{св}$, Н, и предварительное (без тока) $P_{пр}$, Н; размеры рельефа: диаметр d_p и высота h_p , мм.

Значения параметров режима рельефной сварки, приводимые в таблицах, следует корректировать в зависимости от условий: конструкции машины, качества подготовки свариваемых поверхностей, количества и расположения рельефов, возможности изменения (модулирования) силы тока в процессе сварки.

С увеличением диаметра рельефа (следовательно, и толщины свариваемых деталей) плотность тока уменьшается. Например, при сварке деталей толщиной 0,6 мм с диаметром рельефа 2 мм плотность тока $j = 1\,500$ А/мм², а при толщине деталей 2 мм и диаметре рельефа 5 мм $j = 440$ А/мм². Средняя плотность тока j составляет 200...500 А/мм². При сварке по кольцевым рельефам плотность тока значительно меньше, чем при сварке по сферическим рельефам.

Продолжительность сварки задается в зависимости от толщины деталей и силы сварочного тока. Особенно велика продолжительность сварки при выполнении соединений из деталей большой толщины и одновременно сварке деталей разных рельефов.

Усилие сжатия электродов зависит от площади рельефа и механических свойств металла детали. Удельное давление при рельефной сварке составляет 70 ... 100 МПа, в некоторых случаях (при большой жесткости деталей) достигает 150 МПа. Постоянная величина усилия сжатия должна сохраняться в течение всего времени нагрева рельефов, что обеспечивается конструкцией сварочной машины и ее электродной части.

Размеры рельефов (диаметр и высота) зависят от толщины свариваемых деталей и устанавливаются с учетом обеспечения минимального диаметра литого ядра $d_{\text{я}}$. Общее усилие сжатия электродов, как правило, пропорционально числу рельефов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется контактной сваркой?
2. В чем заключаются достоинства контактной сварки?
3. Какие недостатки присущи контактной сварке?
4. Перечислите способы контактной сварки.
5. Чем отличаются друг от друга точечная и шовная сварка?
6. В чем состоит разница между стыковой сваркой сопротивлением и оплавлением?
7. Что такое рельефная сварка?
8. Как различаются машины для контактной сварки по способу сварки и по характеру их установки?
9. Из каких частей состоят машины для контактной сварки?
10. Для чего при контактной сварке нужны электроды?
11. Из каких материалов изготавливаются электроды для контактной сварки?
12. Как можно повысить стойкость электродов?
13. Как устроены электроды для точечной сварки?
14. Как устроены электроды для шовной сварки?
15. Что представляют собой электроды для стыковой сварки?
16. Как подготавливаются детали к контактной сварке?
17. Какие параметры режима применяются при точечной и шовной сварке?
18. Почему в зоне контактной сварки выделяется теплота?
19. Как можно обеспечить стационарный нагрев зоны контактной сварки?

20. Почему при сварке на подвесных контактных машинах качество сварных соединений стабильнее, чем на стационарных машинах?
21. Что такое жесткий и мягкий режимы сварки?
22. От чего зависит выбор параметров режима точечной и шовной сварки?
23. Какие параметры режима применяются при стыковой сварке?
24. От чего зависит выбор параметров режима стыковой сварки?

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

4.1. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

Сварка давлением — это способ получения неразъемного соединения деталей путем их совместного пластического деформирования.

Известны две разновидности сварки давлением: без нагрева (сварка взрывом, магнитно-импульсная, холодная) и с нагревом (кузнечная, ультразвуковая, высокочастотная, газопрессовая сварка трением, диффузионная).

Природа образования соединения во всех случаях сварки давлением — с нагревом или без него — одна: это результат взаимодействия активированных атомов соединяемых поверхностей. Различают три стадии процесса образования соединения при сварке давлением.

На первой стадии происходит физический контакт и активация поверхностей, которые сближаются до расстояния, соизмеримого с параметром кристаллической решетки. В этот момент атомы металла соединяемых деталей преодолевают энергетический барьер, но сохраняют устойчивое состояние и не сливаются — соединение еще не произошло.

На второй стадии за счет образования химического соединения активированных поверхностей и сближения атомов металла соединяемых деталей до расстояния межатомарного взаимодействия происходит сварка. Ширина границы раздела между деталями становится соизмеримой с шириной межзеренной границы, а прочность соединения — с прочностью основного металла.

На третьей стадии активируется диффузионный обмен через объединенную поверхность соединения. При этом вновь полученная поверхность раздела размывается или расчленяется продуктами взаимодействия. В зависимости от продолжительности третьей стадии и рода соединяемых металлов происходит один из следующих процессов:

- замещение мелкозеренной границы раздела крупными кристаллизованными зернами — при сварке деталей из однородных металлов при длительной выдержке. Прочность соединения в этом случае снижается на 10...20 %;
- развитие диффузионной прослойки, состоящей из твердого раствора металлов свариваемых деталей — при сварке пар металлов с неограниченной растворимостью друг в друге при достаточно большой выдержке (до 10 мин). Прочность соединения в этом случае выше прочности одного из металлов пары.

При соединении деталей из некоторых разнородных металлов в паре может образоваться хрупкая и непрочная эвтектика — механическая смесь кристаллитов компонентов этих металлов. Другие разнородные металлы в паре могут образовывать друг с другом химические соединения — интерметаллиды, которые имеют высокую прочность, но низкую пластичность. При сварке таких металлов между собой в их контакте на третьей стадии процесса образуются эвтектические и интерметаллидные включения, ухудшающие механические свойства промежуточной прослойки. Поэтому при затягивании третьей стадии диффузионные процессы в контакте разнородных металлов могут привести к полному разрушению соединения.

Основная трудность при всех способах сварки давлением заключается в необходимости обеспечить физический контакт между соединяемыми поверхностями и активировать их так, чтобы минимизировать остаточную деформацию деталей (вмятины, грат).

Реальные поверхности кроме макро-, микро- и субмикрошероховатостей имеют макроотклонения или отклонения формы сопрягаемых поверхностей, характеризующие точность их обработки. Физический контакт должен сопровождаться большой деформацией. Действительно, чтобы снять микронеровности высотой всего 10... 15 мкм или выровнять неплоскостность на 50... 500 мкм, приходится деформировать всю массу детали на величину, достигающую 90 % ее толщины. Это «вынужденная» деформация ϵ_b — относительная остаточная деформация, при которой под действием усилия сжатия произошло завершение физического контакта по всей плоскости сварки.

Деформацию ϵ_b можно уменьшить одним из трех приемов:

- уменьшением деформационного упрочнения шероховатого слоя в контакте путем замедленного сжатия деталей

при высокой температуре нагрева (диффузионная и газопрессовая сварка). В этом случае ε_b составляет 5... 15 %;

- резким увеличением напряженного состояния в шероховатом слое контакта путем чисто контактного сжатия (сварка взрывом, магнитно-импульсной энергией). В этом случае $\varepsilon_b \rightarrow 1$;
- созданием чисто контактного локального нагрева при одновременном сохранении условий, при которых не происходит деформационного упрочнения в контакте. Этот прием применяется при контактной сварке с $\varepsilon_b = 15\%$ и при прецизионной контактной сварке с $\varepsilon_b = 2... 5\%$.

Среди известных способов сварки давлением только при диффузионной сварке и сварке взрывом ε_b приближается к минимально возможной. Это обусловлено контактированием с критическими скоростями, при которых благодаря диффузионным процессам разрушение контакта преобладает над его деформационным упрочнением. Для всех остальных способов сварки давлением фактические скорости контактирования намного превышают критические. Следовательно, при этих способах нельзя получить соединения с минимальной остаточной деформацией. Например, чтобы при холодной сварке получить соединение с минимальной осадкой, скорость контактирования при комнатной температуре должна быть настолько медленной, что для завершения сварки потребуются годы.

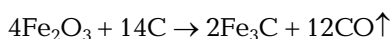
Несмотря на это способы сварки давлением значительно расширяют область применения сварки, позволяя сваривать между собой детали из разнородных металлов, соединение которых сваркой плавлением невозможно, неметаллические детали с металлическими и резко повышают производительность в условиях массового производства.

4.2. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ С НАГРЕВОМ

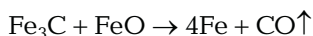
Кузнечная сварка. Кузнечная (кузнечно-горновая) сварка — родоначальница всех современных способов сварки давлением. Сварог — имя древнеславянского бога-кузнеца. Сварожичем называли огонь, считая его сыном Сварога. Отсюда произошло слово «сварка». «Сварить» — значит намертво соединить два куска железа посредством огня и ударов кузнеца. Тайнственная роль кузнеца у древних славян почиталась священной. Кузнец владел тайнствами горя-

чей обработки металлов и основной технологией того времени — кузнечной сваркой. Найденные в раскопках инструменты, оружие и сельскохозяйственные орудия VIII—VII вв. до н. э. показывают, что кузнечная сварка вплоть до конца XIX в. была единственным способом изготовления всех изделий из железа. Все инструменты и оружие делались только сварными. Режущие и рубящие части инструмента изготавливались из стали с содержанием 0,6...0,9 % углерода, державочные части — из мягкого железа. Кузнечная сварка появилась как прием превращения первичного (кричного) хрупкого железа в пластичное, ковкое.

Первичное железо — результат восстановления красного железняка древесным углем при нагреве до температуры 1 300 °С:



Первичное железо представляет собой малоприспособную для изготовления поковок смесь чистого железа с карбидом железа Fe_3C — цементитом (его температура плавления составляет 1 150 °С). Для придания слитку пластичности его необходимо нагреть в горне до «сварочного жара» (800...900 °С), окисляя поверхность, и многократно расплющить, поочередно сворачивая вдвое («уковать»). При уковке цементит восстанавливает железо из оксида:



Благодаря такой уковке из поковки удаляется избыток углерода и кислорода, чем обеспечивается ее пластичность. Кроме того, оказалось, что две свернутые части поковки снова становились одним монолитом. Это явление и назвали кузнечной сваркой.

Только в 1970-х гг. было установлено, что в процессе взаимодействия карбида железа с его оксидами образуется так называемое активированное железо. Такое железо, концентрируясь в контакте между двумя поверхностями, является «сшивающим» материалом, так как несет на своей поверхности свободные, активированные атомы, способные к образованию прочного неразъемного соединения. Процесс идет при высокой температуре, поэтому кузнечная сварка завершается при $\epsilon_{\text{в}} = 20 \dots 30 \%$.

Кузнечная сварка была незаменима в течение 24 веков при изготовлении клинков, кольчуг, якорей, металлических решеток, предметов домашней утвари, лемехов плугов и т. п. В наше время кузнечная сварка применяется главным образом для ремонта изделий в сельской местности. Кузнечной сваркой хорошо сваривается мягкая сталь, содержащая 0,15...0,25 % углерода.

Ультразвуковая сварка. Ультразвуковая сварка (УЗС) основана на использовании энергии ультразвуковых колебаний. Свариваемые детали зажимают между опорой и сварочным наконечником, который колеблется с частотой 20...30 кГц при амплитуде 0,5...50 мкм и сдавливается усилием 0,1...1 предела текучести металла свариваемой детали в течение 0,1...3 с.

Специфический вид энергии — ультразвук — способен резко снижать силы внешнего и внутреннего трения в «озвученных» металлах (т.е. подвергнутых воздействию ультразвука), делая их сверхпластичными. Ультразвук увеличивает скорость диффузии в «озвученных» металлах в 10^7 раз, что создает условия, при которых твердый металл ведет себя как жидкое вещество. При этом в металле происходят акустические кавитационные явления: чередование высоких локальных давлений с разрежением. Это способствует очистке свариваемых деталей от жировых и других загрязнений, измельчает твердые оксидные пленки и интенсивно удаляет их, активизирует свариваемые поверхности. В зоне воздействия ультразвуком температура металла увеличивается до 0,7 температуры его плавления.

Все эти особенности ультразвука обеспечивают основное технологическое преимущество УЗС: возможность сварки деталей (в том числе из алюминия и его сплавов) без предварительной подготовки поверхности. УЗС обладает малой энергоемкостью (0,5...4 кВ·А) и легко автоматизируется при скорости сварки 1...20 м/мин. Способом УЗС хорошо свариваются детали из черных и цветных металлов, детали, резко отличающиеся друг от друга по толщине (например, 0,03 и 4 мм), и детали из разнородных металлов. Возможна сварка без предварительного снятия защитных пленок, сварка многослойных деталей и деталей из полимерных материалов.

Основные технологические параметры режима УЗС: площадь ввода ультразвука в зону сварки, амплитуда колебаний сварочного наконечника, сварочное усилие (сила сжатия деталей) и продолжительность сварки. Они рассчитываются с учетом физико-механических и теплофизических свойств материала, а затем экспериментально проверяются и уточняются. Выходные характеристики ультразвукового генератора должны обеспечивать выделение необходимой энергии в зоне сварки. Амплитуда колебаний сварочного наконечника должна расти пропорционально толщине свариваемых деталей и пределу текучести их материала. Например, при изменении толщины детали от 0,2 до 0,8 мм амплитуда колебаний наконечника должна увеличиться с 4 до 12 мкм, а при замене алюминия никелем — с 12 до 16 мкм. В то же время при воз-

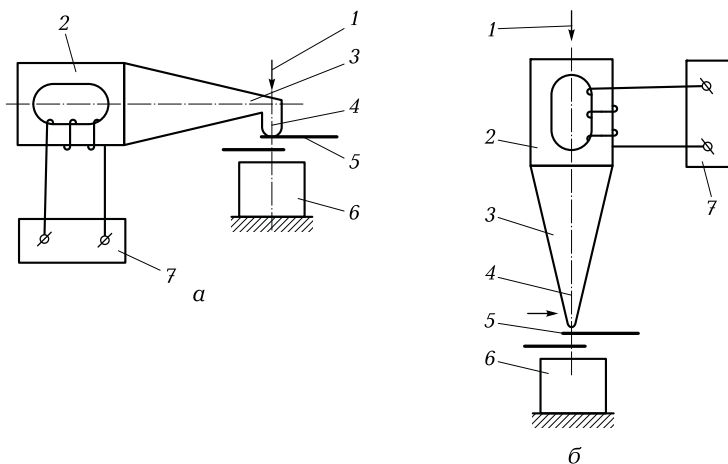


Рис. 4.1. Колебательные системы для УЗС:

а — продольная (для сварки металлических деталей); *б* — поперечная (для сварки пластмассовых деталей); 1 — привод усилия сжатия; 2 — магнитострикционные преобразователи; 3 — волноводы; 4 — сварочные наконечники; 5 — свариваемые детали; 6 — опоры; 7 — генераторы тока

растании силы сжатия деталей и диаметра наконечника (площади ввода ультразвука) амплитуду колебаний наконечника можно пропорционально снизить.

Технологическое оборудование для УЗС имеет типовую структуру. Для сварки металлических деталей чаще применяются установки с продольной колебательной системой, а для сварки пластмассовых — с поперечной (рис. 4.1).

Установка для УЗС содержит привод усилия сжатия, волновод со сварочным наконечником и магнитострикционный преобразователь, который питается от генератора электрического тока ультразвуковой частоты. Преобразователь выполняется как единое целое с волноводом из материала, обладающего магнитострикционными свойствами: способностью сжиматься (никель) или расширяться (железкокобальтовые сплавы) под действием магнитного поля. Электрический ток от генератора создает в катушке преобразователя переменное магнитное поле, которое возбуждает в металле преобразователя ультразвуковые механические колебания. Волноводом эти колебания усиливаются до амплитуды 20...50 мкм и передаются через наконечник свариваемым деталям.

Ультразвуковая сварка применяется в приборостроении и радиоэлектронике при изготовлении деталей толщиной 0,03...3 мм

из алюминия, меди и их сочетаний, причем провода к этим деталям можно приваривать без снятия изоляции. Обмотки трансформаторов и обкладки конденсаторов из анодированной алюминиевой фольги свариваются с токоподводами из латуни и алюминия без зачистки фольги. Способом УЗС привариваются термопары и датчики из коррозионно-стойких сплавов. Этот способ сварки трудно заменим при соединении мембран толщиной 0,05...0,1 мм из палладиевых сплавов с массивными деталями при изготовлении химических аппаратов.

Процесс УЗС сопровождается выделением теплоты в зоне сварки. Температура зависит от твердости материала свариваемой детали, его теплофизических свойств (теплопроводности, теплоемкости), параметров режима сварки. При УЗС температура не превышает $0,6T_{пл}$. Существует оптимальное давление, при котором развивается максимальная температура. В то же время повышение температуры не является определяющим фактором, так как сварные соединения приобретают максимальную прочность раньше, чем достигается максимальная температура в контакте.

Прочность P_{σ} точечных соединений зависит от продолжительности сварки $t_{св}$ и усилия сжатия Q (рис. 4.2). При малых усилиях сжатия прочность зависит от продолжительности сварки. С увеличением усилия сжатия сварные соединения становятся прочнее при меньшей продолжительности сварки. При больших усилиях

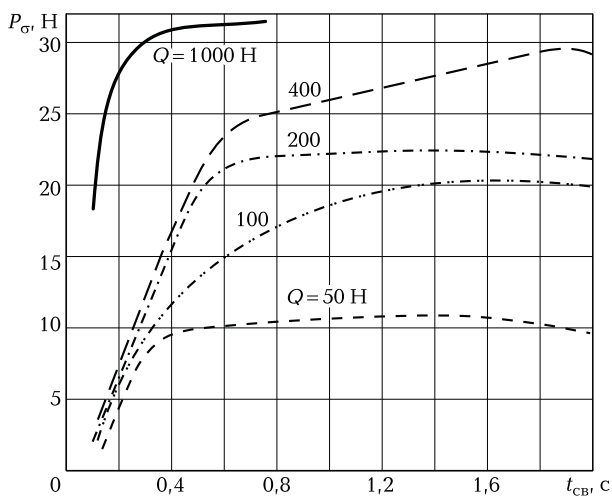


Рис. 4.2. Зависимость прочности P_{σ} точечных соединений из алюминия при срезе от усилия сжатия Q и продолжительности сварки $t_{св}$

сжатия и продолжительности сварки формируются некачественные соединения (вследствие значительных деформаций основного металла и приваривания его к сварочному наконечнику).

При шовной сварке получают качественные сварные соединения. Обычно прочность сварного шва выше прочности основного металла. При испытаниях на прочность разрушение происходит по основному металлу. Большие значения предела прочности соединений, сваренных способом УЗС, подтверждают то, что они образуются вследствие возникновения металлических связей в местах схватывания.

Повышение амплитуды динамического напряжения на границе раздела свариваемых деталей может быть достигнуто за счет искусственных механических концентраторов на контактирующих поверхностях (например, на различных выступах с острой кромкой). Такое искусственное уменьшение площади контактной поверхности позволяет фиксировать критическое сечение в конкретной зоне детали и интенсифицировать процесс сварки.

Ультразвуковая сварка находит достаточно широкое применение в электронике для соединения деталей малой толщины из однородных и разнородных материалов. В микроэлектронике этот метод сварки обеспечивает получение высоконадежных соединений, поскольку исключает общий разогрев приборов. На установках УЗС можно приваривать круглые (диаметром до 0,02... 0,1 мм) и плоские (толщиной до 0,05 мм) проводники из алюминия, золота и меди к контактным площадкам из золота, алюминия, меди, серебра, никеля и других металлов, напыленных на диэлектрические подложки.

Способ УЗС также используется в авиационной и автомобильной промышленности для соединения тонкой обшивки и несущей конструкции.

Широкое применение УЗС в промышленности объясняется ее преимуществами по сравнению с другими методами монтажа:

- возможность сварки деталей из металла в твердом состоянии без существенного нагрева места сварки;
- возможность соединений тонких и ультратонких деталей;
- жесткие требования к чистоте свариваемых поверхностей;
- небольшие сдавливающие усилия;
- малая мощность оборудования и несложность его конструкции.

Высокочастотная сварка. Высокочастотная сварка (индукционная, радиочастотная) — это способ сварки давлением, при котором кромки деталей нагреваются токами высокой частоты (ТВЧ) до температуры оплавления. Плотность тока высокой частоты, протекающего по металлу детали, максимальна на ее поверхности, резко уменьшается по мере удаления вглубь детали. Это явление называется поверхностным эффектом. Кроме того, токи высокой частоты, протекающие в двух параллельных проводниках в противоположных фазах, стремятся сблизиться. Это явление называется эффектом близости.

При высокочастотной сварке нагрев деталей производится с помощью индуктора, располагаемого у свариваемого стыка и генерирующего в свариваемых кромках индукционные токи, или с помощью двух электродов, скользящих по поверхности детали. В обоих случаях эффект близости и поверхностный эффект обеспечивают нагрев только в поверхностных слоях кромок (не глубже 0,1 ... 0,15 мм), что способствует снижению расхода энергии и повышению качества сварного соединения, поскольку позволяет избежать перегрев металла вблизи шва.

При высокочастотной сварке деталь формируется перед сварочным узлом в виде заготовки с V-образной щелью между свариваемыми кромками. К кромкам индукционным (с помощью индуктора) или контактными (с помощью вращающегося контактного ролика) способом (рис. 4.3) подводится ТВЧ таким образом, чтобы он проходил от одной кромки к другой через место их касания.

Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, который по мере сближения кромок усиливается, достигается высокая концентрация тока в месте схождения кромок, и они разогреваются. Нагретые кромки сжимаются роликами и свариваются. Качество сварного соединения и расход электроэнергии связаны с особенностями протекания ТВЧ по проводникам.

При протекании тока по проводнику переменный ток распределяется по сечению проводника неравномерно (это и есть поверхностный эффект). У наружной поверхности проводника наблюдается наибольшая плотность тока. Ток высокой частоты проходит лишь по тонкому поверхностному слою проводника.

Поверхностный эффект существенно увеличивает активное сопротивление проводников, что способствует концентрации энергии в поверхностных слоях нагреваемой детали.

При оценке степени проявления поверхностного эффекта используется понятие Δ глубины проникновения тока. В слое толщи-

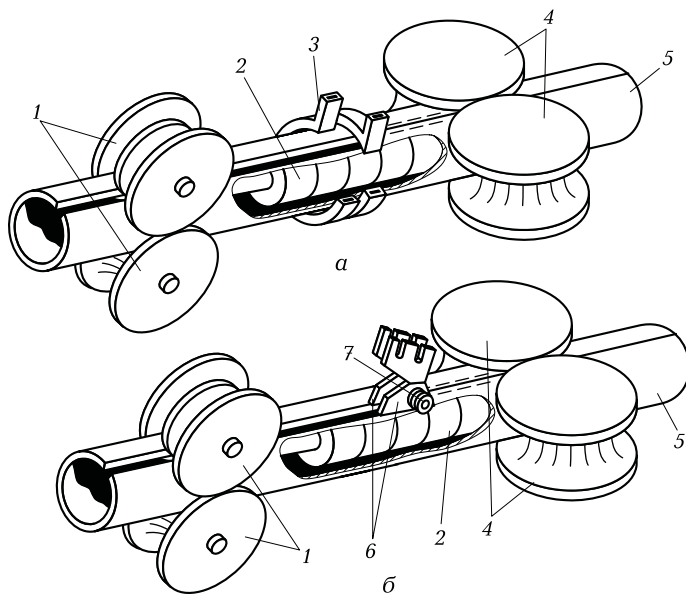


Рис. 4.3. Схемы процесса высокочастотной сварки труб с индукционным (а) и контактным (б) способами подвода ТВЧ:

1 — направляющие ролики; 2 — ферритовый стержень; 3 — индуктор; 4 — сжимающие ролики; 5 — свариваемая труба; 6 — контакты; 7 — вращающийся контактный ролик

ной Δ протекает 86 % полного тока. Толщина Δ определяется по формуле

$$\Delta = [(1/\pi)f\mu\alpha]^{0,5}, \quad (4.1)$$

где f — частота тока; μ — магнитная проницаемость; α — удельная электропроводность проводника.

При этом влиянием толщины проводника можно пренебречь, если она не менее 8Δ , а кривизна поверхности не учитывается, если радиус не менее 4Δ .

При протекании переменного тока в системе проводников, расположенных так, что каждый из них находится не только в собственном переменном магнитном поле, но и в поле других проводников, проявляется эффект близости: ток по периметру проводников течет таким образом, что его плотность в близлежащих точках проводников максимальна, а в наиболее удаленных — минимальна. Чем меньше расстояние между осями проводников и чем больше радиус сечения проводника, тем сильнее проявляется эффект близости.

Если поместить проводник в переменное магнитное поле соленоида или расположить его рядом с индуктором, включенным в цепь переменного тока, то в этом проводнике индуцируются замкнутые в нем вихревые токи обратного направления (по отношению к направлению тока в индукторе). В этом случае также проявляются эффекты, способствующие концентрации тока у поверхности проводника и в зонах, близких к индуктору.

Тепловыделение в проводнике пропорционально квадрату плотности тока, и при быстро протекающих сварочных процессах, когда теплоотдача не оказывает решающего влияния на температурное поле, неравномерность нагрева может быть значительно выше, чем неравномерность распределения тока. Поэтому высокочастотный нагрев неэффективен для сварки деталей большого диаметра и толстостенных труб.

Способы высокочастотной сварки можно подразделить на три группы: сварка давлением с оплавлением, сварка давлением без оплавления и сварка плавлением без давления.

Сварка давлением с оплавлением выполняется при предварительном нагреве и местном расплавлении свариваемых кромок. Для получения качественного сварного соединения необходимо, чтобы весь оплавленный металл, имеющийся в месте контакта свариваемых элементов, был удален при осадке. Удаление оплавленного металла произойдет в том случае, если скорость осадки будет достаточной и металл не потеряет свойства жидкотекучести. Сварное соединение образуется между поверхностями, находящимися в твердом состоянии. Скорость нагрева достигает $15 \cdot 10^4$ °C/с, осадка составляет 0,15...1,5 мм, скорость осадки — 2000 мм/с. Сварка давлением с оплавлением нашла широкое применение при производстве сварных конструкций из черных и цветных металлов. Расстояние от места токоподвода до места схождения кромок обычно лежит в пределах 25...300 мм. На этом отрезке происходит нагрев свариваемых деталей.

Сварка давлением без оплавления выполняется с предварительным нагревом свариваемых поверхностей до температуры ниже точки плавления свариваемого металла. Скорость нагрева не превышает 400 °C/с, осадка — 2,5...6 мм, скорость осадки — 20 мм/с. Процесс сварки при отсутствии восстановительной среды может обеспечивать удовлетворительное качество соединения только в узком интервале температур и при деформациях, достаточных для разрушения оксидных пленок на свариваемых поверхностях.

Сварка плавлением без давления выполняется при нагреве свариваемых элементов до оплавления. Детали, подготовленные

к сварке, плотно подгоняются друг к другу отбортованными кромками, которые разогреваются и оплавляются с помощью индуктора. Ванна расплавленного металла застывает, образуя сварной шов без приложения давления. Скорость нагрева — 250...3 000 °С/с, частота тока источника питания — 70 и 440 кГц. Этот способ целесообразно применять для сварки деталей со стенками толщиной 0,3...1,5 мм и максимальной длиной сварного шва до 500 мм.

Для высокочастотной сварки характерна ярко выраженная локальность нагрева в сочетании с высокими скоростями сварки. Ширина зоны термического влияния в области сварного соединения колеблется в пределах 1...5 мм. Температурные градиенты в зоне шва достигают 1 000 °С/мм. При сварке деталей из низкоуглеродистых сталей средняя скорость охлаждения в интервале температур 1 000...600 °С на границе слоя, нагретого на глубину 1 мм, составляет 1 500 °С/с, на глубину 2 мм — 400 °С/с, на глубину 3 мм — 170 °С/с. Если скорость будет выше критической, то в зоне сварного соединения будут образовываться хрупкие структурные составляющие (мартенсит, троостит). При условии недопустимости наличия хрупких составляющих в сварном соединении проводится последующая нормализация, обеспечивающая распад закалочных структур и образование ферритно-перлитной смеси.

В трубоэлектросварочных агрегатах металлическая лента крапом подается на конвейер и разматыватель, затем правится в валковой машине и после обрезки концов сваривается в непрерывную ленту на стыковой машине. Приводными тянущими роликами лента подается к формовочному стану. Сформированная трубная заготовка поступает в сварочную машину для нагрева кромок и формирования соединения. Наружный грат удаляется гратоснимателем резового типа. Сваренные трубы охлаждаются водовоздушной смесью до 50...60 °С в холодильнике, а затем трубы окончательно калибруются по диаметру. После термообработки труба поступает на трубообрезной станок и на участок отделки.

Высокочастотная сварка применяется для изготовления спирально-шовных труб, приварки ребер жесткости к трубам (рис. 4.4), сварки биметаллических полос.

Высокочастотная сварка ведется при силе тока 1 000...2 000 А частотой 2,5...500 кГц. Усилие сжатия для разных деталей и материалов может быть в пределах 4...15 кг/мм². Мощность машинных или ламповых генераторов высокочастотного тока составляет 15...500 кВ·А.

Высокочастотной сваркой изготавливаются прямошовные трубы из неочищенной горячекатаной низкоуглеродистой стали. Работа

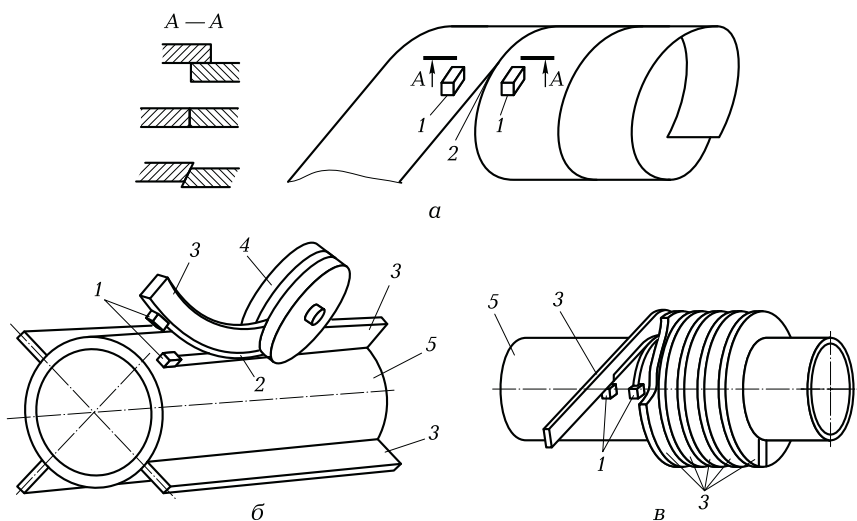


Рис. 4.4. Схемы высокочастотной сварки спирально-шовных труб (а) и приварки продольных (б) и поперечных (в) ребер жесткости к трубам: 1 — контакты; 2 — зона формирования соединения; 3 — ребра; 4 — ролик; 5 — труба

на радиочастоте (более 400 кГц) позволяет выполнять продольные швы труб из алюминия, жаропрочных сплавов, легко окисляющихся металлов. Швы получаются с незначительным внутренним графом, малой шириной зоны термического влияния и хорошими механическими свойствами.

Высокочастотная сварка не требует идеального состояния поверхностей свариваемых деталей и специальной подготовки кромок, легко автоматизируется и позволяет добиться высокой производительности: скорость сварки труб достигает 20... 100 м/мин. Существенный недостаток высокочастотной сварки — сложность оборудования.

Газопрессовая сварка. Газопрессовая сварка представляет собой процесс соединения деталей из металлов в пластичном состоянии. Место сварки нагревается многопламенной горелкой до температуры перехода металла в пластичное состояние, а затем свариваемые элементы сжимаются внешним усилием, действующим по их оси в процессе нагрева либо по его завершении.

Нагревающее пламя может быть направлено перпендикулярно к внешней поверхности деталей (в зазор между их торцами) или к торцам. Схемы различных способов газопрессовой сварки приведены на рис. 4.5 — 4.7.

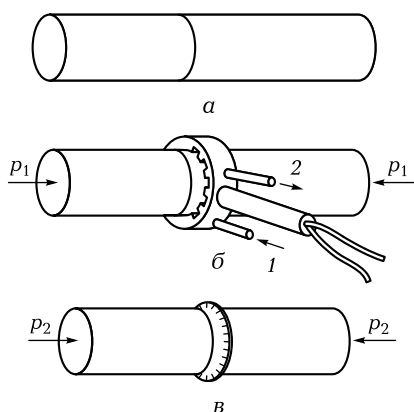


Рис. 4.5. Стадии газопрессовой сварки стержней и труб из металла в пластичном состоянии с нагревом под давлением p_1 :

а — стержни (трубы) перед сваркой; *б* — нагрев стержней (труб) под давлением p_1 до пластичного состояния металла; *в* — осадка стержней (труб) под давлением p_2 ; $p_2 > p_1$; 1, 2 — вход и выход охлаждающей воды

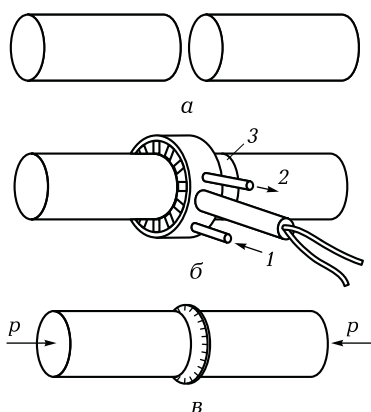


Рис. 4.6. Стадии газопрессовой сварки стержней и труб из металла в пластичном состоянии с оплавлением:

а — стержни (трубы) перед сваркой; *б* — нагрев стержней (труб) при наличии зазора между ними; *в* — осадка стержней (труб) заготовок под давлением p ; 1, 2 — вход и выход охлаждающей воды; 3 — зазор между стержнями (трубами)

Сварка в пластичном состоянии металла выполняется двумя способами. Сварка первым способом выполняется при нагреве кромок до 0,8... 0,9 температуры их плавления под постоянным давлением сжатия (см. рис. 4.5), которое снимается по достижении заданной

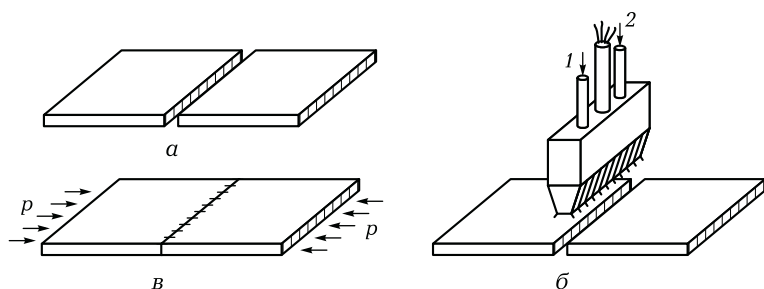


Рис. 4.7. Стадии газопрессовой сварки листов с оплавлением:

а — листы перед сваркой; *б* — нагрев листов до пластичного состояния металла при наличии зазора между двумя листами; *в* — сварка листов под давлением p ; 1, 2 — вход и выход охлаждающей воды

величины осадки, или под переменным давлением: первоначально детали сжимаются небольшим осевым усилием, нагреваются до заданной температуры сварки; затем давление сжатия повышается до максимального значения, и детали свариваются по достижении заданной величины осадки.

Второй способ сварки (с оплавлением) выполняется путем нагрева деталей пламенем, направленным в зазор между их торцами. Когда торцы начинают оплавляться, детали сжимают, они свариваются, а жидкий шлак в виде грата выдавливается наружу из стыка (см. рис. 4.6 и 4.7). При сварке с оплавлением необходима более высокая тепловая мощность пламени, но этот способ не требует предварительной обработки и подгонки кромок, а качество сварного соединения выше, чем при сварке первым способом.

Основными достоинствами газопрессовой сварки являются высокая производительность, низкая стоимость, возможность механизации процесса, относительная простота технологии сварки и сварочного оборудования, отсутствие потребности в мощных источниках электроэнергии, автономность сварочных установок, высокое качество стыковых соединений стержней любой формы и труб, возможность достаточно быстрой подготовки операторов-сварщиков для выполнения сварки деталей определенного сортамента.

В настоящее время газопрессовой сварке отдают предпочтение при ремонте деталей подвижного состава на железнодорожном транспорте. За рубежом она широко используется при возведении сооружений в сейсмически активных районах. Однако с развитием сварки трением и контактной стыковой сварки газопрессовая сварка утрачивает свое былое значение.

Сварка трением. Сварка трением — это способ сварки давлением, при котором нагревается тонкий поверхностный слой детали в результате трения сопрягаемых поверхностей и одновременно происходит очистка от пленок, загрязнений и оксидов. Схемы сварки трением приведены на рис. 4.8.

Первый патент на сварку трением был выдан в 1891 г. в США, однако способ тогда не был внедрен в производство. Практическое использование этого способа началось в СССР в 1956 г. — токарь А. И. Чудиков предложил простейшую схему процесса, получившую название русской конвекционной сварки трением (рис. 4.8, а). Суть этого способа состоит в следующем. Две детали устанавливаются соосно: одна из них закреплена неподвижно фиксаторами сварочной машины, другая приводится во вращение и с усилием F_a прижимается к неподвижной детали. В зоне соприкосновения де-

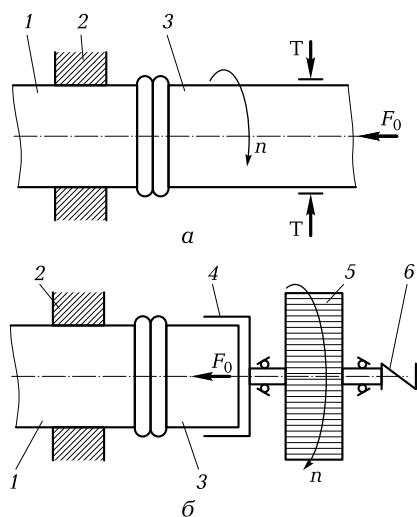


Рис. 4.8. Схемы сварки трением:
 а — обычной (русской конвекционной);
 б — инерционной; 1 — неподвижная деталь; 2 — фиксатор неподвижной детали; 3 — вращающаяся деталь; 4 — захват; 5 — маховик; 6 — муфта сцепления; Т — тормоз; F_0 — усилие прижима при вращении; n — частота вращения детали

и останавливают маховик. За короткое время торможения маховика детали свариваются.

Позже были разработаны и внедрены в производство другие способы: сварка трением двух деталей через вращающуюся вставку, позволившая соединить массивные или длинные детали, вращать которые невозможно, вибрационная сварка трением деталей из пластмасс; орбитальная сварка трением, при которой вначале сварки оси вращения деталей смещены относительно друг друга, что обеспечивает равномерный нагрев всей свариваемой поверхности.

Процессу трения всегда сопутствует превращение части механической энергии в тепловую. При взаимном сухом трении двух металлических деталей температура в трущемся контакте растет пропорционально скорости относительного перемещения деталей и давлению, при котором возникает контакт. Выделение теплоты при трении в технике рассматривается как вредное явление и с ним, за редким исключением, ведется борьба. Сварка трением является

талей возникают силы трения. Металл, ставший пластичным в результате нагрева в процессе трения, выдавливается из стыка в радиальном направлении в виде грата. Нагрев прекращается в момент резкого торможения и остановки вращения при сохранении ковочного усилия.

В 1962 г. американская компания «Катерпиллер Трактор и К^о» запатентовала способ инерционной сварки трением (рис. 4.8, б). Суть этого способа состоит в следующем. Маховик сварочной машины приводится в движение от небольшого электродвигателя и разгоняется до заданной скорости, двигатель через муфту сцепления отключается, а маховик через захват соединяется с подвижной деталью, которая с усилием F_0 прижимается к неподвижной детали. Силы трения между деталями тормозят

одним из примеров полезного использования теплоты, выделяющейся при трении.

Механическая энергия перемещения одной из свариваемых деталей при любой схеме сварки трением (рис. 4.9) всегда преобразуется в тепловую: теплота может выделяться при вращении одной детали относительно другой (неподвижной), при вращении вставки между деталями (в том числе, полыми), при возвратно-поступательном движении одной из деталей в плоскости стыка (с относительно малой амплитудой Δ при частоте, близкой к звуковой). При этом детали прижимаются друг к другу с постоянным или возрастающим давлением p . Теплота генерируется в зоне сварки — непосредственно в месте будущего контакта. Сварка завершается осадкой и быстрым прекращением вращения.

По мере увеличения частоты вращения свариваемых деталей при наличии сжимающего давления в зоне стыка происходит притирка контактных поверхностей и разрушение жировых пленок, присутствующих на них до сварки. Граничное трение уступает место сухому трению. Отдельные микровыступы вступают в контакт, деформируются и образуют участки с ненасыщенными связями поверхностных атомов, между которыми мгновенно формируются

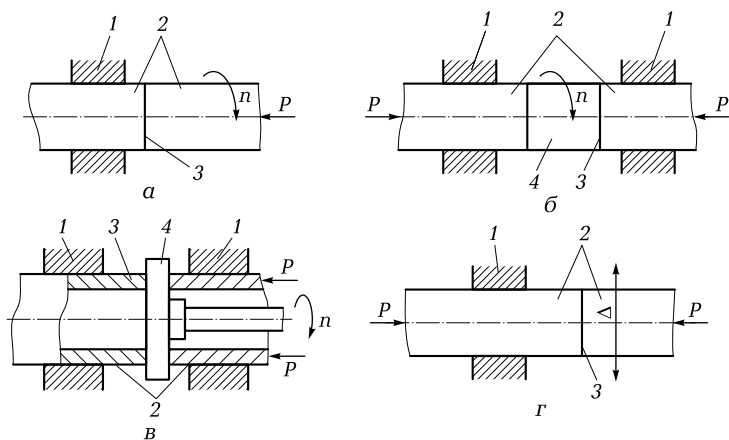


Рис. 4.9. Схемы сварки трением с преобразованием механической энергии в тепловую за счет вращения одной детали относительно другой (а), вращения вставки между цельными (б) и полыми (в) деталями, возвратно-поступательного движения одной из деталей в плоскости стыка (г):

1 — фиксатор неподвижной детали; 2 — свариваемые детали; 3 — зона сварки; 4 — вставка между деталями; Δ — амплитуда возвратно-поступательного движения деталей в плоскости стыка; n — частота вращения детали или вставки

и тут же вследствие относительного движения поверхностей разрушаются металлические связи.

Этот процесс происходит непрерывно и сопровождается увеличением фактической площади контакта и быстрым ростом температуры в стыке. С ростом температуры снижается сопротивление металла деформации, и трение распространяется на всю поверхность контакта. В зоне стыка появляется тонкий слой пластифицированного металла, выполняющего роль смазочного материала. Трение из сухого становится граничным. Под действием сжимающего усилия происходит вытеснение металла из стыка и сближение свариваемых поверхностей (осадка). Контактные поверхности оказываются подготовленными к образованию сварного соединения: металл в зоне стыка обладает низким сопротивлением высокотемпературной деформации, оксидные пленки утонены, частично разрушены и удалены в грат, соединяемые поверхности активированы. После торможения, когда частота вращения приближается к нулю, наблюдается некоторое понижение температуры металла в стыке вследствие теплоотвода. Осадка сопровождается образованием металлических связей по всей поверхности. На заключительной стадии сварки (проковки) под действием осевого усилия сжатия (которое может остаться на прежнем уровне либо увеличиться) и температуры развиваются процессы объемного взаимодействия, способствующие повышению качества сварного соединения.

При формировании соединения большое значение в процессе сварки имеет выделение теплоты. Мощность N выделения теплоты определяется зависимостью

$$N = 2\pi nM, \quad (4.2)$$

где n — частота вращения деталей, с^{-1} ; M — момент сил трения, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

При сварке круглых стержней момент сил трения в зависимости от значений параметров режима сварки приближенно можно оценить по формуле

$$M = (2 \cdot 10^6 / 3) P_n S R f, \quad (4.3)$$

где P_n — удельное давление, МПа ; S — площадь сечения заготовки (поверхность трения), м^2 ; R — радиус свариваемой заготовки, м ; f — коэффициент трения, изменяющийся в пределах $0,1 \dots 1$.

Полную мощность N выделения теплоты можно оценить как

$$N = (2 \cdot 10^6 / 3) P_n v S f, \quad (4.4)$$

где v — линейная скорость на периферийном участке, м/с .

Характер изменения осевого усилия P , частоты вращения n , момента сил трения M , потребляемой мощности N , температуры T и осадки Δl в процессе сварки трением показан на циклограмме (рис. 4.10).

Сварка трением позволяет получать хорошие результаты лишь в тех случаях, когда одна из подлежащих сварке деталей представляет собой тело вращения (стержень, труба), ось которого совпадает с осью вращения, а другая деталь — плоская (пластина или лист). Сваркой трением выполняются следующие виды соединений: стержни встык, трубы встык, стержень встык с трубой, Т-образное соединение стержня или трубы с плоской деталью.

Возможности применения сварки трением ограничиваются формой и размерами сечения свариваемых деталей в месте их сопряжения. Так, сваривать стержни диаметром более 200 мм нецелесообразно, потому что для реализации этого процесса потребовались бы сварочные машины с двигателями мощностью не менее 500 кВт при частоте вращения 2 с^{-1} и осевым усилием более $3 \cdot 10^6 \text{ Н}$. Сооружение такой машины и ее эксплуатация потребовали бы затрат, которые не окупаются прибылью от использования сварки трением. Не удастся сварить (даже в лабораторных условиях) и стержни диаметром менее 3,5 мм, для которых нужна сварочная установка с частотой вращения шпинделя не менее 200 с^{-1} и сложным устройством мгновенного его торможения.

Расчеты и опыт практического применения сварки трением показывают, что ее пока целесообразно применять для сварки деталей диаметром 6...100 мм. Наиболее эффективно применение сварки трением в сфере изготовления режущего инструмента при производстве составных сварно-кованых, сварно-литых или сварно-штампованных деталей. Сварка трением оказывается незаменимой при соединении трудносвариваемых или вовсе не свариваемых другими способами деталей из разнородных материалов (например, из стали и алюминия, аустенитных и перлитных ста-

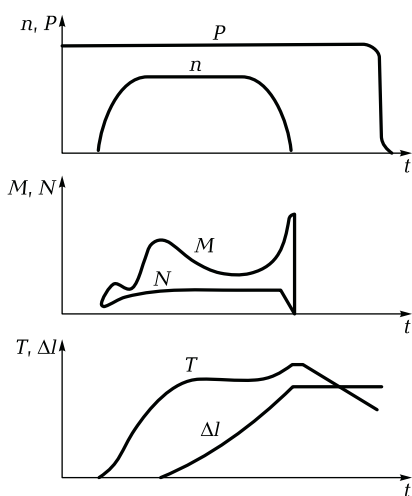


Рис. 4.10. Циклограмма процесса сварки трением

лей). Эффективно применяется сварка трением и для соединения пластмассовых деталей.

Сварка трением обеспечивает высокую производительность (до 600 сварок в час), высокое и стабильное качество соединения, возможность сварки однородных и разнородных материалов, потребляет мало энергии (на порядок меньше, чем контактная сварка), имеет высокий КПД (до 85%), легко поддается механизации и автоматизации. Это экологически чистый процесс, при котором не выделяются вредные газы и отсутствует опасное излучение.

К основным параметрам режима сварки трением относятся удельное давление при нагреве и проковке, время нагрева и проковки, частота вращения детали или вставки, величина осадки при нагреве и величина суммарной осадки. Общее время сварки одного стыка деталей может составлять 2... 22 с при обычной сварке трением и 0,5... 5 с — при инерционной.

Частота вращения детали или вставки определяет общее количество энергии, вложенное в свариваемую деталь, толщину теплогенерирующего слоя, температурное поле в свариваемых деталях, а также характер деформации контактных поверхностей. В диапазоне малых частот вращения имеет место глубинное вырывание частиц металла, в то время как при больших частотах вращения наблюдается износ лишь тончайших приповерхностных слоев металла (эффект полирования). При малых частотах вращения затрачиваемая мощность увеличивается, а производительность процесса уменьшается. Повышенные частоты вращения являются показателем тяжелых условий эксплуатации узлов сварочных машин. Для выбора оптимальной частоты вращения используются некоторые экспериментальные зависимости (где n — частота вращения детали или вставки, c^{-1} ; d_s — диаметр заготовки в месте сварки, мм):

- для деталей из черных металлов $nd_s = (0,3 \dots 0,6) \cdot 10^3$ мм/с;
- для деталей из цветных металлов (алюминия, меди) $nd_s = (0,6 \dots 0,75) \cdot 10^3$ мм/с;
- для деталей из титана $nd_s = (8 \dots 10) \cdot 10^3$ мм/с.

Удельное давление играет важную роль в процессе нагрева и в процессе проковки (при максимальном сближении контактных поверхностей). Применение проковки, которая состоит в увеличении удельного давления с прекращением вращения (тепловыделения), позволяет не только улучшить механические характеристики сварного соединения, но и вести процесс нагрева при несколько пониженных давлениях и, следовательно, применять оборудование

меньшей мощности. Обычно давление проковки $p_{пр}$ и давление нагрева p_n связаны зависимостью $p_{пр} = (2...3)p_n$.

Величина осадки деталей при нагреве и продолжительность нагрева в общем случае взаимосвязаны, и процесс сварки можно регулировать по любому из этих показателей.

В табл. 4.1 приведены параметры режима сварки трением деталей из широко распространенных материалов. В подавляющем большинстве случаев правильно выполненное соединение характеризуется механическими свойствами, близкими к свойствам основного металла. Отклонения прочностных и пластических характеристик соединений в деталях одной партии, сваренных на неизменном режиме, обычно не превышают 5...10 %.

Качество соединений зависит от подготовки поверхностей деталей. Соединяемые поверхности должны быть параллельны друг другу, с них должны быть удалены оксиды, жировые пленки и покрытия (лучше всего путем механической обработки). Образующийся при сварке грат необходимо удалять, поскольку он как концентратор на-

Таблица 4.1. Режимы сварки трением

Марка материала	Диаметр детали, мм	Частота вращения, с ⁻¹	Давление в процессе нагрева, МПа	Давление в процессе проковки, МПа	Осадка детали при нагреве, мм	Продолжительность нагрева, с
Ст3	20	25,0	50	50	5,0	5,0
Ст3	40	16,6	100	100	12,0	20,0
20	20	16,6	50	100	3,5	6,5
15Г	20	25,0	50	100	5,5	6,0
60С2А	20	25,0	50	100	6,0	10,0
25Г2С	22	25,0	45	45	4,0	10,0
20ХНМА	20	16,6	100	220	7,5	7,0
2Х13	20	16,6	100	200	5,5	6,0
Х18Н9Т	18	16,6	70	170	5,0	8,0
1216Н25М6	20	16,6	110	220	5,0	15,0
Д16	40	15,3	35	150	20,0	30,0
Техническая медь	8	23,5	25	150	—	150,0

пряжений уменьшает усталостную прочность сварного соединения. Грат обычно срезается прямо на сварочной машине, но можно удалить его путем оплавления (например, электрической дугой).

Сварка трением применяется для соединения деталей сплошного сечения диаметром 8... 100 мм, трубчатых — диаметром 10... 200 мм. Трением сваривают детали и узлы автомобилей и тракторов, оборудования и аппаратуры для атомной и химической промышленности, пищевого, текстильного, горнодобывающего и подъемно-транспортного оборудования, металлообрабатывающего и измерительного инструмента.

Машины для сварки трением содержат переднюю бабку со шпинделем и зажимом для вращающейся детали, заднюю бабку с зажимом для невращающейся детали, приводы осевого усилия и вращения шпинделя, тормозную систему шпинделя или электродвигателя и систему управления процессом сварки. В машинах для инерционной сварки, кроме того, имеется маховик. Некоторые машины снабжены устройством для снятия графа.

Первая в мире машина для сварки трением (МСТ-1) появилась в СССР в 1958 г. С тех пор производство оборудования для сварки трением непрерывно развивается. В настоящее время ведущая роль принадлежит полуавтоматам с горизонтальным расположением оси шпинделя. К ним относятся отечественные машины второго поколения МФ-327, МСТ-20 и СТ-107 мощностью 40... 160 кВ·А, обеспечивающие усилие сжатия 100... 450 кН и частоту вращения шпинделя 5... 18 с⁻¹. За рубежом оборудование для сварки трением изготавливается фирмами Caterpillar (США), КУКА (Германия), Toyota (Япония).

При сварке трением на оптимальных режимах соединения, как правило, не имеют таких макродефектов, как раковины, поры, неметаллические включения. К дефектам сварки трением относятся несоосность и кривизна, внутренний и наружный кольцевой непровары, трещины, недостаточные прочность и пластичность. Несоосность и кривизна вызываются износом и плохой центровкой зажимных устройств, недостаточной жесткостью станка и большой установочной длиной. Внутренний кольцевой непровар образуется в результате загрязнения поверхности и нарушений теплового режима, наружный — вследствие больших начальных давлений, малой скорости вращения и разной пластичности металла. Трещины возникают при быстром охлаждении или окислении нагреваемых поверхностей. Недостаточные прочность и пластичность могут быть обусловлены перегревом металла стыка и наличием в нем оксидов.

При оценке качества соединения используются разрушающие и неразрушающие методы контроля. К разрушающим методам контроля относятся механические испытания, технологические пробы, металлографические исследования и коррозионные испытания; к неразрушающим — метод ультразвуковой дефектоскопии, целями которого являются обнаружение дефектов (не сплошностей) в стыке, определение их размеров и распределения по сечению свариваемых деталей. Во многих случаях высокое качество сварных соединений обеспечивается контролем параметров режима сварки: продолжительности нагрева, величины и усилия осадки и реже — температуры.

Среди способов сварки трением различаются инерционная сварка, орбитальная сварка и наварка.

Инерционная сварка — это процесс, при котором механическая энергия накапливается во вращающихся маховиках в промежутках между сваркой, а в процессе сварки предыдущей и последующей деталей преобразуется в теплоту. Инерционная сварка начинается с разгона одного или нескольких маховиков, соединенных с приводом через электромагнитную муфту. При накоплении энергии в маховике, раскрученном до определенной угловой скорости, муфта отключается, детали сжимаются, и начинается интенсивное тепловыделение.

Скорость маховика в процессе превращения накопленной в нем кинетической энергии в тепловую падает до нуля. Давление в течение всего цикла сварки может оставаться постоянным или (при снижении угловой скорости маховика до заданного значения или в момент его полной остановки) увеличиваться.

При инерционной сварке расход энергии намного меньше, хотя удельная мощность ($23 \dots 174 \text{ Вт/мм}^2$) значительно выше, чем при обычной сварке трением ($12 \dots 47 \text{ Вт/мм}^2$). Частота вращения изменяется в пределах $25 \dots 85 \text{ с}^{-1}$, давление до торможения составляет $20 \dots 100 \text{ МПа}$, а при торможении в течение $0,2 \dots 0,5 \text{ с}$ оно повышается иногда до 250 МПа .

Орбитальная сварка позволяет соединять детали некруглого сечения, а также заранее ориентированные между собой детали. Обе свариваемые детали во время сварки вращаются синхронно и синфазно, а трение между ними возникает в результате взаимного смещения осей вращения, которые при этом остаются взаимно параллельными. Оси заготовок смещены относительно друг друга на величину орбитального радиуса, обеспечивающего относительное движение. При орбитальной сварке деталей, например, сечением 650 мм^2 орбитальный радиус составляет 3 мм . При увеличении

смещения торцов во время сварки будет иметь место периодическое «оголение» периферийных областей контактных поверхностей, что может привести к их окислению. Выбор основных параметров режимов орбитальной сварки аналогичен выбору параметров обычной сварки трением.

Наварка используется для восстановления изношенных деталей. В отличие от наплавки при наварке не происходит расплавления металла. Наварка выполняется с использованием вращения или вибрации (рис. 4.11).

При наварке с использованием вращения присадочный металл в виде прутка вращается с большой частотой n_1 и его торец с усилием P прижимается к детали, которая вращается с частотой n_2 по мере образования валика. При наварке детали на большой длине ее перемещают еще и в осевом направлении так, чтобы накладываемые по винтовой линии валики перекрывались по краям. Таким способом можно наваривать не только деталей типа тел вращения, но и любые другие поверхности в любом пространственном положении. Наваренные слои имеют удовлетворительные показатели

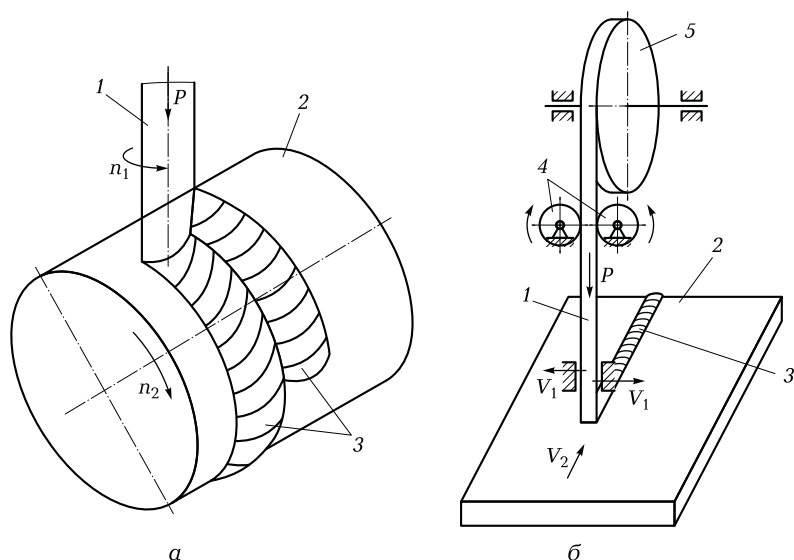


Рис. 4.11. Схемы процесса наварки с использованием вращения (а) и вибрации (б) присадочного металла:

1 — присадочный металл (пруток или проволока); 2 — навариваемая деталь; 3 — наваренный валик; 4 — подающие ролики; 5 — катушка с присадочной проволокой; V_1 — скорость колебаний присадочной проволоки; V_2 — скорость перемещения наплавляемой детали; n_1 — частота вращения прутка; n_2 — частота вращения детали

по прочности и твердости, а затраты электроэнергии значительно меньше, чем при наплавке электродуговыми способами.

Этот способ имеет и существенные недостатки: вращательное движение не позволяет применять для наварки длинные прутки; трудно обеспечить непрерывную подачу прутка к месту наварки через вращающийся шпиндель, а из-за необходимости сохранения жесткости прутка вылет прутка из шпинделя должен быть недостаточно большим. Поэтому процесс нужно вести с частыми перерывами. Названные недостатки ограничивают возможность автоматизации процесса наварки.

Более перспективна наварка с использованием вибрации, которая позволяет избежать указанных недостатков. Этот способ заключается в том, что присадочный металл в виде проволоки (полосы) непрерывно подается роликами из бухты к месту наварки. Концевая часть присадочной проволоки с усилием P прижимается к навариваемой детали и вибрирует. Вибрация только конца проволоки (полосы), а не всей ее массы, позволяет легко автоматизировать процесс.

Сварка трением в настоящее время используется на предприятиях многих отраслей промышленности: при изготовлении узлов для автомобилей, тракторов, мопедов (промежуточных валов, коробок передач, картеров задних мостов, карданных валов, валов рулевого управления, реактивных штанг, валов с коренной шестерней, роликов гусеничного трактора); деталей сельскохозяйственных машин и машин для пищевой промышленности (осей и рычагов зерновых комбайнов, цилиндров гидравлической системы, распределителей и днищ молочных сепараторов, приводных валов землеройных гусеничных машин); деталей и муфт, колес и валов зубчатых передач (корпусов и втулок муфт, зубчатых цилиндрических колес, валов червячных колес); узлов двигателей, газовых турбин, насосов и компрессоров (клапанов двигателей внутреннего сгорания, сопел реактивных двигателей, роторов турбин, кулачковых шайб); деталей подъемно-транспортных и бурильных машин (гидравлических поршневых штоков, поршней со штоками, осей катков транспортеров); инструментов различного назначения.

Сварка трением с перемешиванием. Способ сварки трением с перемешиванием (СТП) был разработан Британским институтом сварки (TWI) в 1991 г. Интенсивное изучение этого процесса с целью совершенствования технологии и создания нового оборудования позволило найти его эффективное применение при производстве высокотехнологичных изделий в таких отраслях, как вагоно-, судо-, авиастроение и многих других. Сварка трением с пере-

мешиванием, относящаяся к процессам соединения материалов в твердой фазе, лишен недостатков, присущих процессам сварки с расплавлением металла. Считается, что, если 10 % общего объема сварных соединений в США выполнять способом СТП, то будет существенно снижен уровень выделения парникового газа. Расчетная экономическая эффективность от внедрения СТП в промышленность США составляет 4,9 млрд долл. в год.

Схема СТП приведена на рис. 4.12. Для сварки используется инструмент в форме стержня, состоящий из двух основных конструктивных элементов: заплечика, или буртика (утолщенная часть), и наконечника (выступающая часть). Размеры этих конструктивных элементов выбираются в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей. Длина наконечника должна быть приблизительно равна толщине детали, подлежащей сварке. Диаметр заплечика может изменяться в пределах 1,2... 25 мм.

Вращающийся с высокой скоростью инструмент в месте стыка вводится в соприкосновение с поверхностью детали таким образом, чтобы наконечник внедрился в деталь на глубину, примерно равную ее толщине, а заплечик коснулся ее поверхности. После этого инструмент со скоростью сварки перемещается по линии соединения. В результате трения металл нагревается вплоть до пластичного состояния, перемешивается вращающимся инструментом и вытесняется в освобождающееся пространство позади движущегося по линии стыка инструмента. Объем, в котором формируется шов, ограничивается сверху заплечиком инструмента. По окончании сварки вращающийся инструмент выводится из стыка за пределы

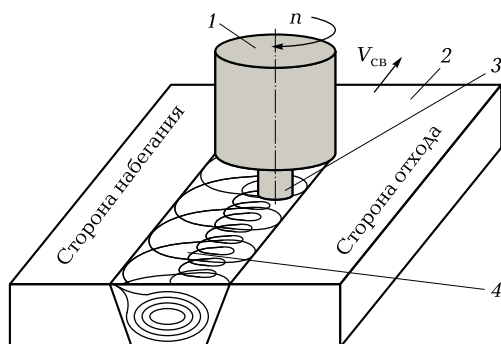


Рис. 4.12. Схема сварки трением с перемешиванием:

1 — заплечик инструмента; 2 — свариваемая деталь; 3 — наконечник (стержень) инструмента; 4 — сварной шов; n — частота вращения инструмента; $V_{св}$ — направление сварки

детали. В связи с асимметрией структуры швов в поперечном сечении сварных соединений, полученных СТП, принято различать сторону набегания (где направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки) и противоположную ей сторону отхода.

Сварка трением с перемешиванием применяется в основном для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых и магниевых сплавов. Выполнена успешная сварка данным способом деталей из медных, никелевых, титановых сплавов и сталей. С помощью СТП за один проход свариваются алюминиевые детали толщиной до 75 мм, выполняются нахлесточные соединения алюминиевых листов толщиной от 0,2 мм. Скорость сварки деталей толщиной 5 мм из сплава 6082 может достигать 6 м/мин.

Основными параметрами режима СТП являются скорость сварки, частота вращения инструмента, усилия прижатия и перемещения инструмента, угол наклона инструмента, размеры инструмента.

Усилия прижатия и перемещения зависят от свариваемого материала, его толщины и скорости сварки. Сварка образцов толщиной 6,35 мм из алюминиевого сплава АМг6 при изменении скорости сварки в диапазоне 59...159 мм/мин и частоты вращения инструмента 180...660 мин⁻¹ показала, что при увеличении частоты вращения возрастает тепловложение в металл и в сварном соединении формируется микроструктура с более однородными зёрнами. При этом до определенного предела также повышаются прочностные и пластические свойства. Для достижения оптимальных условий формирования сварного шва и отсутствия в нем дефектов при повышении скорости сварки необходимо увеличивать частоту вращения инструмента. Полное отсутствие дефектов, все необходимые свойства, надежность и технологичность обеспечиваются правильным выбором режимов, оптимальных для конкретной продукции.

По сравнению с другими способами получения неразъемных соединений СТП имеет ряд преимуществ:

- сохранение в значительной мере свойств основного металла в зоне сварки по сравнению со способами сварки плавлением;
- отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки;
- возможность получения бездефектных швов на деталях из сплавов, которые при сварке плавлением склонны к образованию «горячих трещин» и пористости металла шва;

- отсутствие необходимости в применении присадочного материала и защитного газа, удаления поверхностных оксидов на кромках перед сваркой, а также шлака и брызг после сварки;
- отсутствие потерь легирующих элементов в металле шва.

Максимальная температура при СТП составляет примерно 70 % температуры плавления, а для алюминия не превышает 550 °С. Теплообразование при СТП меньше, чем при аргонодуговой сварке в два раза и для деталей толщиной 4 мм из сплава 1420 составляет 190 и 390 Дж/мм соответственно (при скорости сварки 500 мм/мин).

С помощью математического моделирования тепловых процессов при СТП построен график распределения температуры в свариваемой детали. Более низкая температура металла зоны соединения при СТП по сравнению со сваркой плавящимся электродом (СПЭ) объясняет меньший уровень угловых деформаций в сварном соединении. При СТП угловая деформация равна 1/5—1/7 значений угловых деформаций при СПЭ.

Из-за невысокого уровня температуры нагрева металла при СТП остаточные напряжения в металле достаточно низки. Жестким закреплением деталей обусловлены большие ограничения на деформацию пластин, что препятствует сокращению металла при охлаждении зоны динамической рекристаллизации и зоны термического влияния (ЗТВ) в продольном и поперечном направлении, приводя к поперечным и продольным остаточным напряжениям. При СТП деталей из сплавов АМг6 и 6013 продольные остаточные напряжения выше поперечных (скорость сварки составляла 300...1 000 мм/мин, частота вращения инструмента — 1 000...2 500 мин⁻¹). Высокие растягивающие напряжения наблюдаются преимущественно в металле зоны термического влияния (ЗТВ). При снижении скорости сварки и частоты вращения инструмента остаточные напряжения уменьшаются. Максимальные значения продольных растягивающих напряжений достигают 30...60 % предела текучести сварного соединения и 20...50 % предела текучести основного металла.

Макроструктура сварных швов при СТП характеризуется особенностями, не свойственными швам, полученным сваркой плавлением. Типичным для СТП является образование в центре соединения ядра с овальными концентричными кольцами с разной структурой. К ядру примыкает сложный профиль, характерный для верхней части шва. Наличие овальных колец обусловлено особенностями перемешивания металла наконечником инструмента.

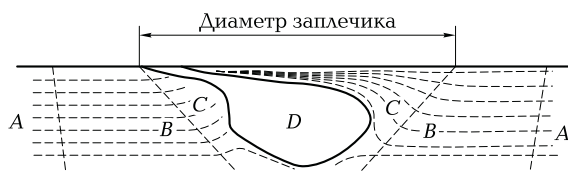


Рис. 4.13. Схема зон стыкового соединения, выполненного СТП:
 А — основной металл; В — ЗТВ; С — ЗТМВ; D — ядро соединения

В сварном соединении выделяются четыре зоны, схематически представленные на рис. 4.13. Непосредственно к зоне А (основной металл) примыкает зона В, где металл детали остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева (это и есть ЗТВ). В зоне С металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву — это зона термомеханического влияния (ЗТМВ). Зона D — ядро соединения, где происходит динамическая рекристаллизация. Твердость металла уменьшается в направлении от основного металла к центру шва и минимальное значение достигается в металле зоны В. Снижение твердости в металле этой зоны является результатом перестаривания и уменьшения плотности дислокаций.

О высоком уровне механических свойств сварных соединений сообщают многие исследователи. Испытания на усталость свидетельствуют о более высоком уровне механических свойств соединений при СТП по сравнению с аргонодуговой сваркой.

В промышленном производстве детали из литейных сплавов часто приходится сваривать с деталями, полученными способом экструдирования. При испытаниях сваривались детали толщиной 4 мм из сплавов ADC1 и А6061-Т6. Результаты, полученные при СТП, сравнивали с результатами аргонодуговой и лазерной сварки. Установлено, что СТП обеспечивает лучшие свойства соединений. Предел прочности составляет 80 % от предела прочности основного металла; при испытании на изгиб разрушение происходит по основному металлу.

В качестве недостатка способа СТП можно отметить образование в конце шва отверстия, равного диаметру наконечника, что требует выведения шва за пределы рабочего сечения детали или заполнения отверстия после сварки с помощью других способов (например, сварки трением специальных пробок).

Совершенствование технологии и оборудования позволяет преодолеть существующие недостатки и расширить области примене-

ния СТП. Хотя СТП применяется в основном для сварки стыковых и нахлесточных соединений, возможно также получение угловых, тавровых, точечных соединений.

Точечную СТП можно реализовать двумя способами: точечной сваркой погружением или точечной сваркой с заполнением шва. При первом способе вращающийся инструмент погружается в деталь, доводя металл в зоне соединения до пластичного состояния и последующего перемешивания его под заплечиком. После этого инструмент поднимается, оставляя характерное углубление в детали. При втором способе используется инструмент с наконечником и заплечиком, имеющими раздельные системы привода. Вращающийся инструмент опускается в деталь, при этом наконечник выдавливает и перемешивает находящийся под ним металл, после чего убирается. Металл под заплечиком заполняет углубление и образует шов без отверстия.

Сварочный инструмент обычно изготавливается из инструментальных сталей и коррозионно-стойкой мартенситной стали. При этом возможно использование составного инструмента с наконечником из кобальтового сплава и заплечиком из стали.

Для сварки способом СТП стальных деталей толщиной до 12 мм разработан инструмент из поликристаллического кубического нитрида бора. Его стойкость значительно выше и позволяет придать наконечнику форму, необходимую для благоприятного течения металла в зоне сварки. Инструмент располагается под углом 2...3° относительно поверхности детали, что обеспечивает наиболее высокие показатели качества.

Разработан саморегулирующийся инструмент, длина наконечника которого определяется действующими на него силами. При отклонении нагрузки на наконечник от заданного значения происходит автоматическая корректировка его длины. Такой инструмент позволяет сваривать детали переменного сечения и избегать образования отверстия при выполнении кольцевых швов.

Для сварки деталей толщиной 50 мм из алюминиевых сплавов разработано семейство инструментов, которые позволяют выполнять сварку за один проход (рис. 4.14).

Новыми вариантами СТП являются технологии Re-Stir, Skew-Stir, Corn-Stir. Технология Re-Stir с переменным вращением инструмента по и против часовой стрелки позволяет исключить асимметрию шва, присущую традиционной СТП. По технологии Skew-Stir инструмент немного наклонен по отношению к шпинделю машины таким образом, что точка пересечения осей шпинделя и инструмента (фокусная точка) может располагаться над, под

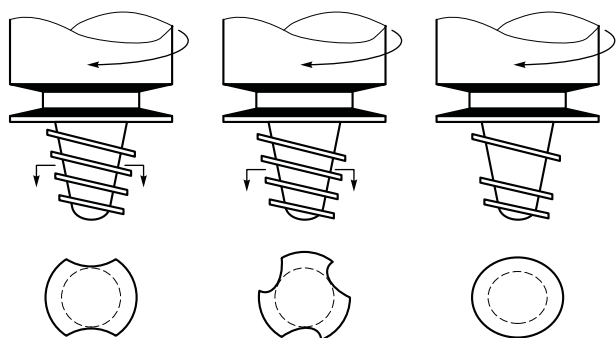


Рис. 4.14. Конструкции рабочего инструмента для СТП за один проход

или в свариваемой детали — в зависимости от свойств материала и параметров режима. Такая особенность при вращении инструмента в процессе сварки позволяет получить более широкий шов. Инструмент обеспечивает формирование более прочных нахлесточных соединений. Особенность технологии Corn-Stir состоит в совмещении в процессе сварки вращательного и орбитального движений инструмента. В результате получают более широкие швы, что используется в основном при соединении разнородных материалов. Разработана система с двумя параллельными инструментами — Twin-Stir.

Развитие новых технологий СТП продолжается постоянно. В Университете Миссури (Колумбия, США) занимаются разработкой СТП с сопутствующим дополнительным нагревом при пропускании тока через наконечник инструмента. Центр обработки и соединения передовых материалов (США) разрабатывает СТП с индукционным предварительным подогревом материала, что позволит увеличить скорость сварки, уменьшить силы, действующие на инструмент, и уменьшить его износ. Рассматривается возможность использования лазера для предварительного подогрева металла при СТП деталей из магниевых сплавов.

Благодаря немногочисленности факторов, влияющих на процесс СТП, и достаточно простой конструкции оборудования способ идеально подходит для автоматизации и роботизации.

Способ СТП уже широко используется при производстве различных высокотехнологичных изделий. Фирмы General Dynamics Land Systems и Edison Welding Institute провели совместные работы, цель которых — обеспечить требуемые баллистические характеристики соединений бронеплит из алюминиевого спла-

ва 2195-T87 для морских бронированных транспортеров. Сварка плит толщиной 31,8 мм способом СТП вместо аргодуговой сварки позволила получить приемлемые прочностные свойства соединений и более пластичные (в 2—3 раза) швы. Сварные соединения (в том числе угловые) успешно прошли баллистические испытания.

Для предотвращения ухудшения свойств сверхпроводящей ниобий-титановой проволоки ее необходимо соединять с жестким элементом из чистого алюминия при температуре ниже 400 °С. Раньше для этого использовали низкотемпературную пайку, но паяные швы имели низкую прочность. СТП обеспечила требуемые свойства сварного соединения в жидком гелии.

С 2003 г. компания Ford Motor Co. (США) изготовила несколько тысяч автомобилей Ford GT, в которых применена СТП центрального отсека, где располагается изолированный от внутреннего отделения топливный бак. Сварка трением с перемешиванием повышает точность размеров и на 30% увеличивает прочность соединений по сравнению с дуговой сваркой в среде защитного газа. С 2003 г. было произведено свыше 100 тыс. автомобилей Mazda RX-8, кузовá которых сваривались способом СТП. Успешное применение данного способа позволяет фирме планировать выполнение подобных соединений при изготовлении автомобилей нового поколения — MX-5.

Активно занимаются изучением и внедрением способа СТП в аэрокосмической отрасли — в 2001 г. он использовался при изготовлении внешнего бака ракеты-носителя для возвращаемых космических кораблей. Технология предусматривает выполнение восьми продольных швов на резервуаре из сплава 2195 для жидкого водорода и четырех продольных швов на резервуаре для жидкого кислорода, что составляет 1/2 мили швов на каждом баке. Разрабатывается оборудование для ремонтной СТП в условиях космического вакуума. Концепция применения СТП в подобном случае основана на том, что высокая частота вращения инструмента (30 000 мин⁻¹) позволит уменьшить усилия, необходимые для выполнения сварки.

Компания Boeing начала использовать СТП при производстве ракет Delta II и Delta III. Сваркой выполняются швы на топливном баке длиной 8,4 м для жидкого водорода, на баке длиной 12 м для жидкого кислорода и на других конструкциях. Сварка трением с перемешиванием обеспечивает повышение качества швов (один дефект на 76,2 м шва) по сравнению с аргодуговой сваркой (один дефект на 8,4 м шва) и уменьшение времени изготовления сварной конструкции. Производство ракет Delta II выросло с 8 до 17 ед. в год.

Проводятся работы по внедрению СТП оребренных панелей толщиной 4 мм из сплавов 2024, 7475, 7050 для крыла самолета. Высокое качество сварки способом СТП обеспечено при производстве самолета Airbus A350 и двух новых версий самолета A340 (A340-500 и A340-600). Компания Eclipse Aviation завершает сертификацию реактивного самолета бизнес-класса Eclipse 500 с узлами, изготовленными способом СТП.

Технология СТП успешно развивается и находит применение в различных отраслях промышленности. Большинство публикаций касаются сварки деталей средней и большой толщины из алюминиевых сплавов. Затруднения обычно возникают при соединении деталей толщиной 0,5...3 и более 40 мм, а также при обеспечении точности сборки тонкостенных заготовок под сварку. В связи с этим проведены исследования процесса СТП на специальной экспериментальной установке. В рамках этих исследований выполнялась сварка деталей толщиной 1,8...2,5 мм из алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1460. Одновременно проверена эффективность сварочного инструмента с различными профилями рабочей части. Установлено, что соединения, выполненные данным способом сварки, отличаются высоким уровнем механических свойств (коэффициент их прочности составляет 0,7...0,9 % от уровня прочности основного металла).

Диффузионная сварка. Диффузионная сварка как способ соединения деталей в твердом состоянии без макроскопических деформаций и без расплавления разработана в 1951 — 1961 гг. Н. Ф. Казаковым.

Суть способа состоит в том, что свариваемые детали стыкуются, прижимаются друг к другу, сдавливаются, нагреваются в вакууме и выдерживаются в течение заданного времени. При этом в результате локальной пластической деформации и последующей диффузии материалов соединяемых деталей друг в друга образуется монолитное сварное соединение.

Международным институтом сварки принято следующее определение: «Диффузионная сварка в твердом состоянии — способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомном уровне, появившихся в результате максимального сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов».

Особенность диффузионной сварки по сравнению с другими способами сварки давлением заключается в применении относи-

тельно высоких температур нагрева $(0,5 \dots 0,7)T_{пл}$ и сравнительно низких удельных сжимающих давлений $(0,5 \dots 0,8 \text{ МПа})$ при изотермической выдержке от нескольких минут до нескольких часов.

Диффузионная сварка позволяет сваривать детали практически из всех известных конструкционных материалов. Хорошо свариваются детали из разнородных материалов (в том числе с сильно отличающимися теплофизическими свойствами), не растворяющиеся друг в друге и образующие при других способах сварки хрупкие химические соединения. Можно сваривать, например, алюминиевые детали со стальными и титановыми, стальные с чугунами, медные с молибденовыми. Свариваются также металлические детали с неметаллическими: стальные с графитовыми, стеклянные с медными и т. д.

Разрушение соединений, полученных диффузионной сваркой, всегда происходит по основному металлу одной из деталей, а при сварке деталей из разнородных материалов — по менее прочному металлу. В соединениях не бывает большинства дефектов, присущих многим традиционным способам сварки (пор, раковин, оксидных включений). Механические свойства соединений стабильны, колебания значений их показателей не превышают $2 \dots 5 \%$.

Расход энергии при диффузионной сварке в $4 \text{—} 6$ раз меньше, чем при сварке плавлением и при контактной сварке. Диффузионная сварка экономична: нет вредных излучений, брызг металла, мелкодисперсной пыли.

Главное достоинство диффузионной сварки — это возможность образования соединения с минимальной деформацией деталей (не более 5%). Допуски на размеры деталей, полученных диффузионной сваркой, соизмеримы с допусками на механическую обработку. Это дает возможность изготовления сложных высокоточных деталей, которые другими способами сварки изготовить нельзя. Примеры таких деталей: массивная решетка из меди, к которой приварена алюминиевая фольга толщиной 8 мкм ; пустотелый стальной стакан со строго заданным внутренним объемом, завершающая операция изготовления которого — приварка крышки.

К недостаткам диффузионной сварки относятся дополнительные затраты времени на создание вакуума в камере, где производится сварка, и усложнение оборудования: необходимы камера, трубопроводы, арматура и насосы для создания вакуума. К подготовке деталей к сварке предъявляются повышенные требования: необходимо соблюдение строгой параллельности стыкуемых поверхностей и высокая чистота их обработки. Такие высокие требования увеличивают трудоемкость. Кроме того, трудно контролировать качество

сварных соединений: например, местные непровары (склейки), образующиеся в результате случайных загрязнений поверхностей, при контроле неразрушающими методами не выявляются.

Технология диффузионной сварки достаточно проста. Очень важно перед сваркой соответствующим образом подготовить соединяемые поверхности деталей. Поскольку величина пластических деформаций металла в зоне сварки мала, требуется, чтобы поверхности деталей имели хороший контакт и малую шероховатость. При сварке деталей из пластичных материалов (алюминия, меди, серебра) не требуется особая обработка поверхности; при сварке деталей из твердых материалов (жаропрочных сплавов, инструментальной стали) их поверхности должны иметь шероховатость, соответствующую 6-му классу чистоты. Такую шероховатость обеспечивает получистовое точение на токарных станках. Обработка абразивным инструментом не рекомендуется, так как частицы абразива, оставаясь на поверхностях, могут препятствовать диффузии при сварке, что снизит прочность соединения. Лучше всего — механическая обработка режущим инструментом. Во избежание непровара обработанные поверхности должны быть строго перпендикулярны оси нагружения при сварке.

Параметрами режима диффузионной сварки являются температура нагрева стыка деталей, давление сжатия деталей, время выдержки при заданных давлении и температуре, глубина вакуума (остаточное давление воздуха в камере).

Температура нагрева стыка деталей из однородных металлов должна составлять 0,5...0,7 температуры их плавления, из разнородных металлов — от температуры плавления более легкоплавкого металла. При такой температуре ускоряется взаимная диффузия атомов соединяемых металлов через поверхность стыка и обеспечивается размягчение металла, облегчающее деформацию поверхностных неровностей (их смятие). При более высокой температуре нагрева увеличивается размер зерен металла в зоне сварки, что ухудшает механические свойства соединения.

Давление сжатия деталей должно быть достаточным для обеспечения плотного контакта соединяемых поверхностей, чтобы в результате деформации все пустоты в стыке были заполнены. При деформации поверхностных слоев стыка происходит разрушение оксидов, что обеспечивает плотный контакт очищенных поверхностей. В зависимости от металла свариваемых деталей давление выбирается в пределах 5...50 МПа (или 0,5...5 кгс/мм²). В общем случае оно должно равняться пределу текучести металла детали при температуре сварки. Увеличение давления сверх этого предела

не увеличивает прочность соединения, но может увеличить деформацию зоны сварки.

Время выдержки при заданных давлениях и температуре в зависимости от металла свариваемых деталей выбирается в диапазоне 1... 10 мин. Этого достаточно для деформации неровностей на стыкуемых поверхностях и завершения процесса диффузии до образования монолитного соединения. При большем времени выдержки увеличивается размер зерен металла в зоне сварки или образование хрупких фаз (например, интерметаллидов при сварке деталей разнородных металлов), что ухудшает механические свойства соединения. После сварки детали охлаждаются в вакууме до температуры 100 °С — это обеспечивает наилучшее качество соединения.

Важное значение при диффузионной сварке имеет глубина вакуума (остаточное давление воздуха в камере). Во-первых, при нагреве в вакууме диссоциируют (разлагаются) оксиды на соединяемых поверхностях, очищая их; во-вторых, вакуум служит защитной средой, предохраняющей металл свариваемых деталей от взаимодействия с газами. Глубина вакуума должна быть во всех случаях не ниже 10^{-2} мм рт. ст. Дальнейшее увеличение глубины вакуума почти не оказывает влияния на прочность соединения, но требует больших временных затрат. Лишь при сварке деталей из активных тугоплавких металлов (титана, тантала, ниобия) целесообразно понижать остаточное давление в камере до 10^{-4} ... 10^{-5} мм рт. ст.

При нарушении параметров режима или условий диффузионной сварки могут возникать дефекты соединений: непровар, слипание, трещины, повышенная деформация деталей, оплавление, смещение деталей относительно заданного положения. Причинами непровара или слипания могут быть недостаточная температура нагрева, недостаточная глубина вакуума, неправильная установка деталей в приспособлении, вызывающая взаимный перекося соединяемых деталей, некачественная подготовка поверхностей к сварке. Трещины могут возникать из-за чрезмерно высокой скорости нагрева или охлаждения, завышенного усилия сжатия, слишком высокой температуры нагрева и большого времени выдержки, а также из-за плохой подготовки поверхностей к сварке. Завышенная температура нагрева и время выдержки также приводят к увеличению деформации и оплавлению деталей при сварке. Причиной оплавления может быть и неравномерный нагрев детали из-за неправильной установки нагревателя. Смещение деталей относительно заданного положения происходит из-за неправильной их установки перед сваркой или вследствие вибрации установки в процессе сварки.

Повышенная деформация, оплавление и смещение деталей хорошо выявляются при визуальном контроле и измерениях размеров детали. Трещины, непровары и негерметичность сварных соединений выявляются известными методами неразрушающего контроля: ультразвуком, капиллярными и магнитными методами, гидро- и пневмоиспытаниями, а также с помощью течеискателя. Небольшие локальные непровары и слипание поверхностей неразрушающими методами контроля не выявляются. Эти дефекты лучше предупреждать путем тщательного контроля качества подготовки соединяемых поверхностей к сварке и строгого соблюдения заданных и проверенных параметров режима сварки. В массовом производстве возможен разрушающий контроль нескольких деталей из партии, который позволяет выявлять непровары и слипания в изломе деталей и корректировать параметры режима.

Диффузионную сварку можно вести на воздухе вне вакуумной камеры. Для этого непосредственно в процессе механической обработки деталей при подготовке их к сварке на соединяемые поверхности наносится консервирующая смазка — густая жидкость, разлагающаяся при нагревании без образования твердых остатков и не реагирующая с материалом свариваемых деталей (например, акриловая смола). Консервирующая смазка предохраняет чистые поверхности от окисления, а при нагревании в процессе сварки образует газообразные продукты, которые, выходя из стыка деталей, препятствуют попаданию туда воздуха.

Качество соединения при диффузионной сварке определяется протекающими при сварке физико-химическими процессами; взаимодействием нагретого металла с газами окружающей среды, очисткой свариваемых поверхностей от оксидов; развитием высокотемпературной ползучести и рекристаллизации. В большинстве случаев это диффузионные, термически активируемые процессы.

Для уменьшения скорости окисления свариваемых заготовок и создания условий очистки контактных поверхностей от оксидов при сварке могут быть применены газы-восстановители, расплавы солей, флюсы, обмазки, однако чаще всего используется вакуум или инертные газы.

При диффузионной сварке не исключена возможность образования прочного соединения между поверхностями с оксидными пленками, но пластичность таких соединений, как правило, относительно низка. Соединение металлов обладает оптимальными свойствами, если оно образуется между чистыми поверхностями.

Очистка поверхностей металлов от оксидов может происходить в результате развития процессов сублимации и диссоциации ок-

сидов, растворения оксидов за счет диффузии кислорода в металл (ионов металла в оксид), восстановления оксидов элементами-раскислителями, содержащимися в металле детали и диффундирующими при нагреве к границе раздела металла. Например, из стали оксиды наиболее интенсивно удаляются путем их восстановления углеродом, а из титана — путем растворения кислорода в металле.

Физический контакт при диффузионной сварке может развиваться в результате процессов, протекающих в зоне сварки одновременно и различающихся степенью высокотемпературной деформации под действием внешних и внутренних напряжений.

Сближение свариваемых поверхностей происходит, в первую очередь, за счет пластической деформации микровыступов и приповерхностных слоев, обусловленной приложением внешних сжимающих напряжений и нагревом металла.

Деформация металла под воздействием постоянного напряжения (постоянной нагрузки) называется ползучестью. Процесс ползучести определяет объемную (накопленную) деформацию заготовок после диффузионной сварки.

В нагретом металле всегда существуют внутренние (собственные) напряжения, появление которых может быть связано с фазовым превращением, анизотропией свойств металла, наклепом. Уровень внутренних напряжений обусловлен их природой и физическими процессами, протекающими в металле при нагреве. Например, величина напряжений, возникающих в титане при полиморфном превращении вследствие изменения объема, составляет 30 МПа.

Под действием внутренних напряжений может происходить деформация поверхностных слоев металла, сопровождающаяся образованием специфического микроструктурного и субструктурного деформационного рельефа. Высота этого рельефа может быть соизмерима с высотой микровыступов, существующих на поверхности после механической обработки.

В процессе деформации свариваемые поверхности, свободные от оксидов, активизируются и при развитии физического контакта схватываются между собой.

При диффузионной сварке деталей из однородных металлов прочность сварного соединения будет равна прочности основного материала в том случае, если структура зоны соединения не отличается от структуры основного металла. Для этого в зоне контакта должны образовываться общие для свариваемых деталей зерна металла. Это возможно за счет миграции границ зерен путем рекристаллизационной обработки либо путем собирательной рекристаллизации.

Дефекты в зоне соединения в виде пор оказывают стабилизирующее влияние на миграцию межзеренных границ. По мере уменьшения зерен до некоторого критического размера становится возможным отрыв границы от дефекта и ее миграция. В зоне соединения образуются общие зерна с локализованными в них дефектами.

Скорость и механизм миграции межзеренных границ зависят от степени искажения и плотности дефектов кристаллической решетки, которые косвенно характеризуются степенью наклепа и глубиной наклепанного слоя.

При диффузионной сварке образцов с предварительно наклепанными поверхностями происходит перераспределение дислокаций, формирование низкоугловых дислокационных границ, которые затем перерастают в высокоугловые границы зародышей рекристаллизации, и растворение границы раздела вследствие зарождения и роста общих зерен.

Повышение плотности дефектов непосредственно в процессе сварки интенсифицирует миграцию межзеренных границ в зоне соединения, которая достигается, например, увеличением скорости деформации.

Однако чрезмерное увеличение скорости деформации может привести к деформационному упрочнению металла в зоне контакта и резкому снижению скорости формирования соединения на всех стадиях процесса.

Диффузионная сварка позволяет решить проблему получения качественного соединения между собой деталей из однородных и разнородных материалов (из алюминия, титана, жаропрочных и тугоплавких металлов и сплавов, керамики, стекла, сапфира, графита, композиционных и порошковых материалов).

Свариваемые детали могут быть разными по форме, иметь компактные или развитые поверхности контактирования; их геометрические размеры — от нескольких микрометров до нескольких метров.

Схематически процесс диффузионной сварки можно представить следующим образом. Свариваемые детали собираются в приспособлении, позволяющем передавать давление в зону стыка, помещаются в камеру, где создается рабочий вакуум, и нагреваются до температуры сварки. После этого к собранным деталям прикладывается сжимающее давление на заданную продолжительность сварки. В некоторых случаях после снятия давления соединение дополнительно выдерживается при температуре сварки для более полного протекания рекристаллизационных процессов, способствующих формированию качественного соединения. По оконча-

нии сварочного цикла соединение охлаждается в вакууме, инертной среде или на воздухе.

В зависимости от напряжений, вызывающих деформацию металла в зоне контакта и определяющих процесс формирования соединения, условно можно выделить две разновидности диффузионной сварки: сварка с высокоинтенсивным ($P = 20 \dots 100$ МПа) и сварка с низкоинтенсивным ($P < 2$ МПа) силовым воздействием (удельным давлением).

При диффузионной сварке с высокоинтенсивным силовым воздействием сварочное давление, как правило, создается с помощью пресса, снабженного вакуумной камерой и нагревательным устройством. В ряде случаев используются открытые прессы. При этом свариваемые детали помещаются в герметичные контейнеры, где создан рабочий вакуум, и нагреваются до температуры сварки.

Во избежание потери устойчивости свариваемых элементов, для передачи давления в зону сварки и создания условий для направленной деформации металла в зоне стыка диффузионная сварка выполняется в приспособлениях с пустотами (межреберными пространствами), заполненными технологическими элементами — стальными вкладышами, блоками, прокладками, мембранами, которые после сварки демонтируются или удаляются химическим травлением.

При сварке с высокоинтенсивным силовым воздействием локальная деформация металла в зоне соединения, как правило, достигает нескольких десятков процентов, что обеспечивает стабильное качество соединения.

При диффузионной сварке с низкоинтенсивным силовым воздействием допустимые сжимающие усилия ограничены устойчивостью тонкостенных элементов. Этот способ не требует создания сложного специализированного оборудования и во многих случаях можно использовать существующие технологические схемы и оснастку, применяемые при пайке. Диффузионная сварка с низкоинтенсивным силовым воздействием успешно используется для изготовления слоистых конструкций.

При изготовлении плоских (или с большим радиусом кривизны) конструкций сжимающее усилие проще всего обеспечивается действием атмосферного давления воздуха Q на внешнюю поверхность технологической оснастки при понижении давления газа в зоне соединения. Наличие технологических элементов, обладающих локальной жесткостью и помещенных с внешней стороны свариваемых элементов, исключает возможность потери обшивками устойчивости с образованием прогибов на неподкрепленных участ-

ках. Величина сварочного давления P ограничивается предельным напряжением потери устойчивости технологических элементов.

При изготовлении конструкций сложного криволинейного профиля может быть использована технологическая схема, при которой давление нейтрального газа воспринимается непосредственно внешними элементами самой конструкции (несущими обшивками, оболочками). В процессе сварки под давлением газа обшивки на неподкрепленных участках деформируются (прогибаются). Это ухудшает условия для формирования соединения, но уменьшает сечение сообщающихся каналов и ухудшает аэродинамическое состояние поверхности. В этом случае давление P ограничивается напряжением, при котором имеет место чрезмерная остаточная деформация обшивок на неподкрепленных участках.

В ряде случаев можно исключить применение внешнего давления для сжатия свариваемых заготовок, используя явление термического напряжения, возникающего при нагреве материалов с разными коэффициентами линейного расширения. При сварке коаксиально собранных заготовок коэффициент линейного расширения охватывающей детали должен быть меньше коэффициента линейного расширения охватываемой детали.

Формирование качественного соединения при диффузионной сварке в вакууме определяется комплексом факторов, основными из которых являются температура, давление, время выдержки, степень разрежения, чистота обработки поверхности. В свою очередь, параметры режима сварки зависят от фазового состава и структуры металлов свариваемых деталей, а также от типа соединения.

В основе формирования сварного соединения лежат термически активируемые диффузионные процессы, развитие которых стимулирует повышение температуры сварки. Для снижения сжимающего давления и уменьшения продолжительности сварки температуру нагрева свариваемых деталей целесообразно устанавливать по возможности более высокой: при этом металлы меньше сопротивляются пластической деформации, развивается процесс рекристаллизации, происходит миграция границы раздела между свариваемыми деталями. Вместе с тем необходимо учитывать возможность развития процессов структурного превращения, гетеродиффузии и образования эвтектик — все это приводит к изменению физико-механических свойств металлов свариваемых деталей.

Удельное давление влияет на скорость образования диффузионного соединения и накопленную деформацию свариваемых деталей. В большинстве случаев с повышением удельного давления (т. е. с переходом в область высокоинтенсивного воздействия) уменьша-

ется продолжительность сварки и увеличивается деформация. Так, при сварке с использованием высоких удельных давлений (до нескольких десятков мегапаскалей) время образования соединения может измеряться секундами, а деформация металла в зоне соединения — десятками процентов. При сварке с использованием низких удельных давлений (до десятых долей мегапаскаля), ограниченных устойчивостью тонкостенных элементов, продолжительность сварки может измеряться часами, а деформация соединяемых деталей — долями процента. Таким образом, задача выбора удельного давления должна решаться с учетом типа конструкции, технологической схемы и геометрических размеров свариваемых деталей, а времени сварки — с учетом температуры и удельного давления.

Зависимость прочности соединения при статическом испытании на растяжение от времени сварки (при сварке деталей из однородных металлов) описывается кривой, близкой к параболе. При сварке деталей из разнородных металлов увеличение длительности сварки может сопровождаться снижением механических характеристик соединения из-за развития процессов гетеродиффузии, приводящих к формированию в зоне соединения хрупких интерметаллидных фаз.

В настоящее время наиболее распространенным способом защиты металла от окисления является сварка в специальных вакуумных камерах или контейнерах, оснащенных системами откачки воздуха.

Повышению класса чистоты поверхностей, подготовленных под сварку, способствует интенсификация формирования физического контакта. При этом существенную роль играет развивающийся при сварке деформационный рельеф.

При подготовке к диффузионной сварке в условиях массового производства для получения поверхностей высокого класса чистоты традиционные способы подготовки соединяемых деталей к сварке (точение, фрезерование, шлифование) не могут использоваться из-за их низкой производительности. Эти способы неэффективны также при изготовлении конструкций с развитой соединяемой поверхностью. Высокопроизводительными способами обработки в таких условиях являются пневмодинамический, гидродробеструйный и вибрационный, а также виброшлифование и виброполирование.

В настоящее время диффузионная сварка используется при изготовлении тонкостенных слоистых конструкций, соединении пористых спеченных деталей из никеля с коррозионно-стойкой сталью, создании пористого фильтра, изготовлении из титанового сплава рабочих колес турбин закрытого типа.

4.3. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ БЕЗ НАГРЕВА

Холодная сварка. Холодная сварка — это способ соединения деталей при комнатной и даже отрицательной температуре без нагрева внешними источниками. Сварка осуществляется специальными устройствами, вызывающими одновременную направленную деформацию предварительно очищенных поверхностей и нарастающее (до определенной степени) напряженное состояние, при котором образуется монолитное высокопрочное соединение.

Холодной сваркой можно соединять детали из алюминия, меди, свинца, цинка, никеля, серебра, кадмия, железа и других металлов. Особенно велико преимущество холодной сварки по сравнению с прочими способами сварки при соединении деталей из разнородных металлов, чувствительных к нагреву или образующих интерметаллиды.

Отсутствие нагрева позволяет сваривать холодной сваркой детали из термически разупрочняемых металлов и герметизировать емкости, нагрев которых не допустим. Холодная сварка обладает малой энергоемкостью, экономична (не выделяется газ, нет брызг, излучений, шума) и обеспечивает надежное соединение деталей из разнородных металлов (например, из алюминия и меди), предотвращая образование хрупкой интерметаллидной прослойки.

К недостаткам холодной сварки относятся возможность соединения деталей только из пластичных металлов, наличия глубоких вмятин при нахлесточном соединении, неприменимость для соединения деталей сложной формы и мелких деталей, невозможность сварки в труднодоступных местах, неуниверсальность.

Холодная сварка — сложный физико-химический процесс, протекающий только в условиях пластической деформации, без которой в обычных атмосферных условиях даже при очень высоких удельных сжимающих давлениях на соединяемые детали практически невозможно получить монолитное соединение.

Оксидные пленки и слои адсорбированных газов сильно затрудняют сварку, но ошибочно считать, что при сварке в атмосферных условиях получают до конца очищенные, ювенильные поверхности. Существует критическая толщина пленки, при превышении которой получить монолитное соединение невозможно. При толщине оксидной пленки меньше толщины межзеренных границ соединения обладают достаточной прочностью и пластичностью. Утонение исходных оксидных пленок до критической толщины происходит в процессе пластической деформации контактных поверхностей при сварке.

Главным препятствием для холодной сварки, не устранимым даже глубокой пластической деформацией, являются не оксидные, а водяные и жировые пленки на поверхности соединяемых деталей: даже незначительное количество жира и влаги, перенесенное с рук на поверхность металла, делает холодную сварку невозможной. Жировая пленка при деформировании металла растягивается, не теряя сплошности, и препятствует сближению поверхностей до конца процесса. Химическим травлением и обезжириванием жировые пленки полностью не удаляются, остатки травящих и моющих веществ остаются на поверхности деталей и также препятствуют сварке. Не помогает даже многократное промывание спиртом-ректификатом. При соединении деталей внахлестку жировые пленки можно удалять стальной щеткой диаметром 50 ... 200 мм, вращающейся с частотой 1 500 ... 3 000 мин⁻¹ и прижимаемой к поверхности с усилием 1 ... 2 МПа. При соединении деталей встык лучше механически обрезать торцы деталей. Если зачистку производить неудобно, то при сварке мелких деталей целесообразно использовать никелирование (или отжиг), а при сварке деталей из фольги — анодирование поверхности. Время от подготовки поверхности до сварки не ограничивается.

Например, при вдавливании пуансона по схеме холодной точечной сварки площадь контактных поверхностей алюминиевой детали увеличивается более чем в 40 раз. Характер линий течения металла показывает, что они, подступая с глубинных слоев металла к оксидным пленкам, расположенным на контактных поверхностях, последовательно «смыывают» эти пленки — захватывают их со стороны металла и сдвигают на периферию. При этом оксидные пленки неравномерно утоняются от центра зоны сварки к периферии.

Характер утонения оксидных пленок приближенно можно определить по закону постоянства объема:

$$F_{\text{н}}Y_{\text{н}} = F_{\text{к}}Y_{\text{к}}, \quad (4.5)$$

где $F_{\text{н}}, F_{\text{к}}$ — исходная и конечная площадь пленки; $Y_{\text{н}}, Y_{\text{к}}$ — исходная и конечная толщина пленки. Обычно $Y_{\text{н}} = 5 \dots 10$ нм, $F_{\text{к}} = 40F_{\text{н}}$.

Отсюда $Y_{\text{к}}$, нм:

$$Y_{\text{к}} = F_{\text{н}}Y_{\text{н}} / (40F_{\text{н}}) = 0,1 \dots 0,25. \quad (4.6)$$

Следовательно, суммарная толщина оксидных пленок в контакте может составлять 0,2 ... 0,5 нм, что близко к размеру ячейки кристаллической решетки алюминия, которая составляет 0,4 ... 0,41 нм и не превышает толщины межзеренной границы.

Вследствие неравномерного распределения напряжений и деформаций в контакте возможно образование совершенно чистых ювенильных поверхностей.

В случае контакта ювенильных поверхностей их схватывание происходит при незначительной пластической деформации. Чем толще поверхностные пленки в момент соединения металлов, тем большая энергия требуется для активации поверхностных атомов. Источником энергии активации атомов при холодной сварке может быть механическое давление или вызванное им напряжение.

Расчеты показывают, что давление, приложенное в конечный период холодной сварки, тождественно механической или эквивалентной ей тепловой энергии, которая в принципе могла бы нагреть металл до некоторой достаточно высокой условной температуры (табл. 4.2). При низких температурах амплитуда колебаний атомов тем больше, чем выше давление их сжатия, т. е. сжатие, так же как и нагрев, способно «наполнить» металл энергией.

Растекание металла в плоскости соединения приводит к интенсивному движению дислокаций с образованием активных центров на соединяемых поверхностях.

Таким образом, роль деформации при холодной сварке заключается в предельном утонении или удалении оксидной пленки, сближении свариваемых поверхностей до расстояния, соизмеримого с размером ячейки кристаллической решетки металла, а также в повышении энергетического уровня поверхностных атомов, обеспечивающего возможность образования химических связей.

Качество сварного соединения определяется исходным физико-химическим состоянием контактных поверхностей, давлением (усилием сжатия) и степенью деформации при сварке, а также

Таблица 4.2. Соответствие условной температуры T_m удельному давлению P при холодной сварке

Металл	P , МПа	T_m , °С
Алюминий	1 000 ... 1 200	405 ... 497
Медь	2 200 ... 2 500	746 ... 856
Кадмий	300 ... 400	147,6 ... 196,8
Олово	250 ... 300	151,8 ... 181,5
Свинец	120 ... 135	80,9 ... 91,6
Цинк	870 ... 900	312 ... 322,3

схемой деформации и способом приложения давления (статического, вибрационного). Поэтому перед сваркой необходима тщательная предварительная подготовка контактных поверхностей: удаление внешних загрязнений, обезжиривание, зачистка. Особенно мешают сварке органические загрязнения, трудноудаляемые из зоны соединения при совместной деформации свариваемых деталей.

Наилучшая свариваемость достигается после механической зачистки поверхностей ножом или шабером, когда срезается тонкий поверхностный слой, содержащий оксидные пленки и слои адсорбированных органических соединений, влаги, газов. Но этот способ неэффективен в производственных условиях. Наиболее распространенным и производительным способом является зачистка поверхностей вращающейся металлической щеткой из стальной проволоки диаметром 0,08 ... 0,3 мм.

Химической зачистке эффективно подвергать поверхности деталей сложной формы, труднообрабатываемые механическим способом. Так, алюминиевые детали травятся в 5 ... 10%-ном растворе щелочи, медные — в 40%-ном растворе азотной кислоты.

Свариваемость деталей после химической зачистки начинает снижаться через 6 ч, в то время как после механической зачистки — через 24 ч.

Для очистки алюминиевых деталей также применяется прокаливание с выжиганием жировых пленок при температуре 350 ... 400 °С. Образующиеся в результате оксидные пленки разрушаются при деформации деталей.

Нельзя прикасаться руками к очищенным поверхностям, так как жировые пленки, перенесенные с рук на поверхность металла, делают холодную сварку невозможной. Инструмент, используемый для механической зачистки поверхностей, должен быть тщательно обезжирен.

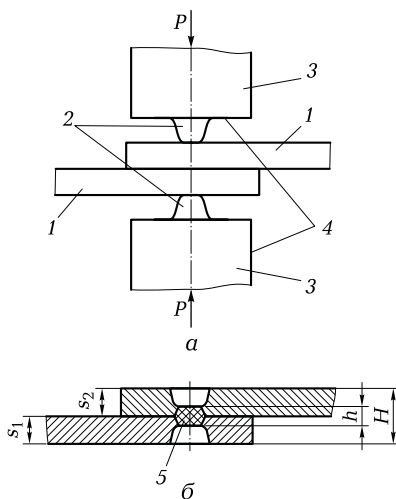
В зависимости от схемы пластической деформации свариваемых деталей холодная сварка может быть точечной, шовной и стыковой.

Точечная сварка — наиболее простой и распространенный способ холодной сварки. Ее применение рационально для соединения алюминиевых деталей с алюминиевыми, алюминиевых с медными, армированного алюминия с медью. Холодная точечная сварка позволяет заменить трудоемкую клепку и контактную точечную сварку.

При холодной точечной сварке (рис. 4.15) зачищенные детали 1 устанавливаются внахлестку между пуансонами 3, имеющими рабочую часть 2 и опорную поверхность 4. При вдавливании пуансонов

Рис. 4.15. Схема холодной точечной сварки (а) и геометрия сварного соединения (б):

1 — зачищенные детали; 2 — рабочие части пуансонов; 3 — пуансоны; 4 — опорные части пуансонов; 5 — монокристаллическое соединение; s_1 , s_2 — толщина первой и второй деталей соединения; h — толщина монокристаллического соединения; H — суммарная толщина соединения



сжимающим усилием P происходит деформация деталей и сварка соединения. Опорная часть пуансонов создает дополнительное напряженное состояние в конечный момент сварки, ограничивает глубину погружения пуансонов в металл и уменьшает коробление деталей.

Отожженные детали (толщиной 0,8... 5 мм) рекомендуется сваривать круглым пуансоном, а нагартованные — прямоугольным или более сложным. Рациональный диаметр d рабочей части круглого пуансона определяется по формуле

$$d = (1,8 \dots 3,5)s, \quad (4.7)$$

где s — толщина детали.

В конечный момент сварки общее давление $P_{\text{общ}}$ состоит из давления на рабочую часть пуансона и давления на его опорную часть (обжатие точки):

$$P_{\text{общ}} = PF_{\text{р}} + P_{\text{оп}}F_{\text{оп}}, \quad (4.8)$$

где $F_{\text{р}}$ и $F_{\text{оп}}$ — площадь рабочей и опорной частей пуансона соответственно; P и $P_{\text{оп}}$ — удельное давление на рабочую и опорную части пуансона соответственно.

Минимальное удельное давление P при сварке деталей из олова составляет 90 МПа, из отожженного алюминия — 160 МПа, из меди — 280 МПа, из АРМКО-железа — 750 МПа, из стали Х18Н9Т — 2000 МПа. В производственных условиях детали из алюминия свариваются при минимальном удельном давлении 260 МПа,

а АРМКО-железо — при 1 300 МПа. Удельное давление ориентировочно можно определить из зависимости

$$P = 3\sigma_T \quad (4.9)$$

где σ_T — предел текучести металла свариваемой детали.

Удельное давление на опорную часть при сварке деталей из алюминия $P_{оп} = 25 \dots 50$ МПа (нижний предел — для деталей малой толщины).

Для оценки способности металлов к холодной точечной сварке принято условное понятие «свариваемость» или «коэффициент остаточной толщины» S , %, который определяется зависимостью

$$S = h \cdot 100 / (s_1 + s_2),$$

где h — толщина монолитного соединения (остаточная толщина между пуансонами); s_1, s_2 — толщина первой и второй свариваемых деталей соединения.

Для алюминия (при толщине 0,8...4 мм) оптимальная свариваемость равна 30 %, с увеличением толщины листов в пределах 5...10 мм свариваемость снижается до 20 %. Свариваемость может быть повышена до 40 %, но для этого требуются высокие давления на опорную часть пуансона, обеспечивающие достаточное напряженное состояние. При высокой степени деформации ($S = 10\%$) прочность точек растет, но резко повышается давление, необходимое для сварки, увеличиваются деформации и коробление свариваемых деталей. Прочность точек можно повысить на 10...20 % при сварке по схеме с предварительным обжатием (рис. 4.16).

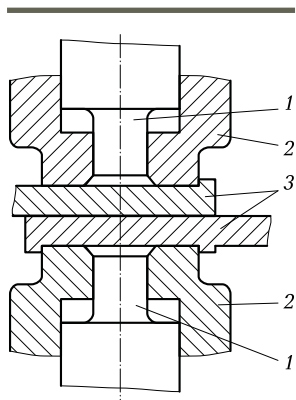


Рис. 4.16. Схема холодной точечной сварки с предварительным обжатием:

1 — пуансоны; 2 — прижимы;
3 — свариваемые детали

Свариваемые детали 3 предварительно обжимаются прижимами 2 (до или одновременно с вдавливанием пуансона 1). Наличие зоны обжатия вокруг вдавливаемого пуансона уменьшает коробление деталей и повышает напряженное состояние в зоне сварки, что приводит к периферийному провару за площадью отпечатка пуансона. Но при этом возникают технические затруднения, связанные с созданием двух высоких давлений на малой площади поверхности и устранением затекания металла между пуансоном и прижимом. Такой способ позволяет сваривать детали из низкопластичных материалов.

Благодаря простоте выполнения холодная точечная сварка не требует специальных машин и успешно реализуется на серийных прессах с использованием кондукторов, надежно фиксирующих свариваемые детали, что исключает их коробление.

Холодная шовная (роликовая) сварка (рис. 4.17) характеризуется непрерывностью монолитного соединения. По механической схеме эта сварка аналогична холодной сварке прямоугольными пуансонами.

Собранные детали 3 устанавливаются между роликами 1 и сжимаются ими до полного погружения их рабочих выступов 2 в металл детали. Затем ролики приводятся во вращение. Пере-

мещающая детали и последовательно внедряясь рабочими выступами в металл, ролики вызывают его интенсивную деформацию, в результате которой образуется непрерывное монолитное соединение — шов 4.

Шовная сварка бывает двухсторонняя, односторонняя и несимметричная. Двухсторонняя сварка выполняется одинаковыми роликами. При односторонней сварке один ролик имеет выступ высотой, равной сумме высот выступов роликов при двухсторонней сварке, а второй — является опорным и рабочего выступа не имеет. При несимметричной сварке ролики имеют различные по размерам (а иногда и по форме) рабочие выступы.

Односторонняя шовная сварка чаще применяется для соединения деталей при сварке разнородных металлов, сильно отличающихся по твердости. Рабочая часть ролика вдавливаются в более твердый металл. Такая сварка при прочих равных условиях обеспечивает более прочные швы и при сварке деталей из однородных металлов.

При шовной сварке металл свободно течет вдоль оси шва. Это затрудняет создание достаточного напряженного состояния металла в зоне сварки. Поэтому для достижения провара требуется большая пластическая деформация (на 2...6%), чем при точечной сварке. Напряженное состояние в зоне сварки можно повысить, увеличивая диаметр роликов. Обычно диаметр ролика близок к 50б,

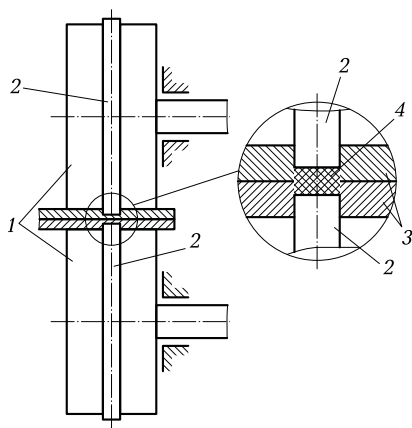


Рис. 4.17. Схема холодной шовной (роликовой) сварки:

1 — пуансоны (ролики); 2 — рабочие выступы пуансонов (роликов); 3 — собранные детали; 4 — сварной шов (монолитное соединение)

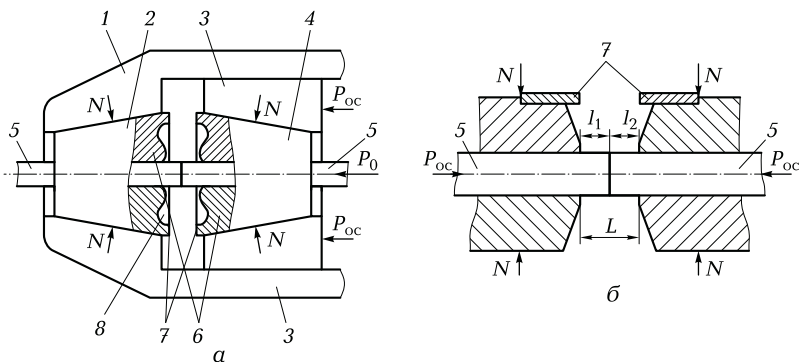


Рис. 4.18. Схемы холодной стыковой сварки с одним подвижным и одним неподвижным зажимами (а) и с двумя подвижными зажимами (б):

1 — корпус; 2 — неподвижный конусный зажим; 3 — направляющие подвижного конусного зажима; 4 — подвижный конусный зажим (ползун); 5 — свариваемые детали; 6 — режущие кромки формирующих частей зажимов; 7 — упоры; 8 — углубления зажимов; N — давление прижима на деталь; P_0 — давление на деталь до осадки; P_{oc} — усилие осадки

ширина рабочего выступа составляет $(1 \dots 1,5)\delta$, высота $(0,8 \dots 0,9)\delta$, а ширина опорной части ролика, ограничивающая деформации, в 2—3 раза больше ширины его рабочего выступа. Шовная сварка деталей толщиной 1 мм из алюминия при свариваемости 27 % выполняется со скоростью до 8... 12 м/мин.

Для холодной шовной сварки используются металлорежущие станки (например, фрезерные). Для сварки деталей малой толщины из пластичных металлов — ручные настольные станки.

Холодная стыковая сварка реализуется по одной из двух схем: с одним подвижным и одним неподвижным зажимами или с двумя подвижными зажимами (рис. 4.18).

Схема сварки с одним подвижным и одним неподвижным зажимами (рис. 4.18, а) — одна из первых схем холодной стыковой сварки — до сих пор не потеряла практического значения. В корпусе 1 имеются гнездо для неподвижного конусного зажима 2 и направляющие 3 подвижного конусного зажима 4. После предварительной зачистки торцов свариваемые детали 5 устанавливаются в неподвижный конусный зажим 2, который имеет формирующие части с режущими кромками 6 и упором 7. Усилие осадки прикладывается к подвижному конусному зажиму 4, при перемещении которого торцы деталей сжимаются и фиксируются с помощью обоих конусов. Под действием усилия осадки углубления 8 зажимов заполняются металлом раньше, чем смыкаются упоры 7. Поэтому, когда

упоры сомкнутся, в зоне контакта деталей создается достаточное напряженное состояние. В стыке происходит соединение деталей (сварка), а остаток вытекающего металла отрезается режущими кромками 6. В зависимости от расположения режущих кромок можно получить соединение с усилением или без усиления шва.

Режим стыковой сварки определяется припуском на сварку или установочной длиной L , складывающейся из установочной длины обеих свариваемых деталей: $L = l_1 + l_2$, усилием зажатия; удельным давлением (усилием) осадки, скоростью деформирования или скоростью осадки.

При сварке деталей равного сечения из однородных металлов ($L = 2l$) величина l для деталей из алюминия составляет $(0,8 \dots 1,2)d$, из меди — $(1,25 \dots 1,75)d$, из свинца — $(1,0 \dots 1,2)d$, где d — диаметр или толщина детали.

Усилие зажатия должно быть таким, чтобы исключить возможность течения (сдвига) металла в зажимах по всему сечению свариваемых деталей: $(1,45 \dots 1,6)P_{ос}$, где $P_{ос}$ — усилие осадки.

Удельное давление (усилие) осадки зависит от металла детали и его структурного состояния, от сечения заготовки, формы и размера формирующих устройств, скорости осадки. Удельное давление осадки обычно определяется опытным путем. Например, для деталей из алюминия оно составляет $450 \dots 850$ МПа, из меди — $1\,050 \dots 1\,450$ МПа.

Осадку желательно вести вначале с плавным, а затем с интенсивным увеличением скорости (например, до 100 мм/с). Любая скорость осадки должна обеспечить симметричное одновременное деформирование свариваемых деталей.

В машиностроительной промышленности холодная стыковая сварка выполняется в основном с помощью специальных устройств и приспособлений на имеющихся на предприятии прессах. В электротехнической промышленности используются ручной инструмент, настольные станки и машины.

Для сварки алюминиевых проводов сечением $2,5 \dots 10$ мм² и медных сечением $2,5 \dots 4$ мм² разработаны ручные клещи КС-6, для сварки алюминиевых и медных проводов сечением до 25 мм² — настольный станок СНС-3.

Холодная стыковая сварка — чисто механический процесс, поэтому удобна для автоматизации. В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработан полуавтомат, который используется в условиях поточного производства. Оператор производит только укладку деталей в ручки зажимов, а зажатие, отрезка концов, осадка, перехват (в случае повторной осадки), вторая осадка, удаление грата,

раскрытие зажимов и выталкивание выполняются автоматически. Полуавтомат позволяет сваривать алюминиевую проволоку сечением до 90 мм^2 и медную сечением до 30 мм^2 .

Машины МСХС и МХСД с гидравлическим приводом отличаются низкой мощностью тока, применяемого лишь для привода гидравлического насоса. Так, машина МСХС-35 выполняет холодную стыковую сварку медного провода сечением до 150 мм^2 , потребляя мощность $1,7 \text{ кВт}$, тогда как при контактной стыковой электросварке такого же провода требуется мощность $75 \dots 80 \text{ кВт}$. Машины МХСД-40 и МХСД-80 предназначены для сварки троллейбусных проводов и фидеров тяговых подстанций и создают усилие осадки до 400 и 800 кН соответственно. Производительность машин — 60 и 100 сварок в час соответственно.

Сварка взрывом. Сварка взрывом — это сравнительно новый и перспективный технологический процесс, позволяющий получать биметаллические конструкции практически неограниченных размеров из разнообразных металлов и сплавов, в том числе из тех, сварка которых другими способами затруднительна.

При сварке взрывом соединения получаются под действием энергии, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ). Принципиальная угловая схема сварки взрывом приведена на рис. 4.19. Неподвижная пластина (основание) 4 и μεταемая пластина (облицовка) 3 располагаются под углом $\alpha = 2 \dots 16^\circ$ с минимальным зазором между пластинами $h = 2 \dots 3 \text{ мм}$ при его вершине. На облицовку укладывается заряд 2 взрывчатого вещества, а в вершине угла устанавливается детонатор 1. Сварка производится на опоре 5. После инициирования взрыва детонация распространяется по заряду ВВ со скоростью D в несколько тысяч метров в секунду.

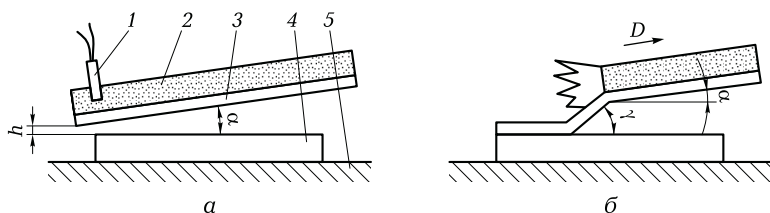


Рис. 4.19. Принципиальная угловая схема сварки взрывом до начала (а) и во время взрыва (б):

1 — детонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — μεταемая пластина (облицовка); 4 — неподвижная пластина (основание); 5 — опора; D — направление распространения детонации; h — минимальный зазор между пластинами при вершине угла; γ — угол соударения пластин; α — угол между пластинами

Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва облицовка приобретает скорость V_n в нескольких сотен метров в секунду и соударяется с основанием под углом γ , который увеличивается с ростом отношения V_n/D . В месте соударения возникает эффект кумуляции — из зоны соударения пластин с очень высокой скоростью выбрасывается кумулятивная струя, состоящая из металла основания и облицовки. Эта струя обеспечивает очистку свариваемых поверхностей в момент, непосредственно предшествующий их соединению. При оптимальных режимах сварки со свариваемых поверхностей удаляется слой металла суммарной толщиной 1 ... 15 мкм.

Соударение облицовки и основания сопровождается пластическим деформированием, вызывающим местный нагрев поверхностных слоев металла, в результате чего развивается физический контакт, активируются свариваемые поверхности и образуется соединение.

Исследование пластической деформации в зоне соударения пластин по искажению координатной сетки показало, что прочное соединение образуется только там, где соударение пластин сопровождается взаимным сдвигом их поверхностных слоев. Там, где взаимный сдвиг не произошел (в частности, в зоне инициирования взрыва), прочное соединение не было получено. «Лобовой» удар облицовки в основание без тангенциальной составляющей скорости и сдвиговой деформации в зоне соединения не приводит к сварке.

Процесс сварки взрывом определяется скоростью V_n метания облицовки, углом γ соударения пластин, давлением, длительностью соударения, температурой в зоне соударения.

Технологически режим сварки задается скоростью распространения детонации D ; безразмерным параметром r , представляющим собой отношение $r = m_{ВВ}/m_{Пл} = \delta_0/\rho_0 = \delta_1/\rho_1$ (где $m_{ВВ}$, $m_{Пл}$ — масса заряда и облицовки соответственно; δ_0 , ρ_0 — толщина слоя ВВ и плотность его заряда; δ_1 , ρ_1 — толщина и плотность облицовки); минимальным зазором h между пластинами при угле α .

Детонация — это процесс разложения ВВ с выделением газов и теплоты. Скорость D распространения детонации определяется типом ВВ, его плотностью и толщиной слоя. В однородных зарядах скорость детонации растет с увеличением плотности по линейному закону. В некоторых неоднородных (смесевых) ВВ скорость распространения детонации растет с увеличением их плотности до определенного значения, а при дальнейшем уплотнении — снижается. С увеличением слоя ВВ скорость распространения детонации повышается, достигая своего максимального значения при некоторой предельной толщине слоя (для каждого конкретного ВВ она своя).

При дозвуковой скорости распространения детонации $D < C_0$ (где C_0 — скорость распространения звука в металле свариваемой детали) под действием кратковременного импульса давления газов (продуктов разложения ВВ) и сжимающих напряжений на поверхности металла успевает развиться пластическая деформация, частично поглощающая энергию, вводимую в металл при взрыве. Волна разгрузки (растягивающих напряжений), возникающая при окончании сжатия, вызванного давлением газообразных продуктов детонации, имеет сравнительно небольшую амплитуду и, как правило, не опасна ни для металла, ни для сварного соединения.

При сверхзвуковой скорости распространения детонации $D > C_0$ пластическая деформация не развивается. В металле возникают локализованные падающие и отраженные ударные волны, которые медленно затухают и могут приводить к повреждению металла.

При сварке взрывом выбирается ВВ, скорость распространения детонации которого меньше скорости распространения звука в металлах соединяемых пластин и находится в диапазоне от 1 500 м/с до C_0 . Например, скорость распространения звука в стали составляет 5 900 м/с, в алюминии — 6 260 м/с, в меди — 4 700 м/с, а скорость распространения детонации различных сортов аммонитов находится в пределах 2 500... 6 000 м/с, аммиачной селитры — 1 800 м/с, гексогена — 6 600 м/с. В отечественной и зарубежной практике в качестве ВВ при сварке взрывом применяются игданиты — смесь аммиачной селитры с дизельным топливом; чем выше содержание дизельного топлива в смеси, тем ниже скорость распространения детонации.

Скорость распространения детонации при сварке взрывом определяет нормальную скорость V_n , развиваемую облицовкой, и давление в очаге сварки при соударении пластин. Недостаточная скорость V_n приводит к непрочности соединения или к непровару. Так, для сварки деталей из сталей $V_n < 500... 700$ м/с. Чрезмерно высокая скорость V_n может привести к образованию в облицовке и основании трещин под действием падающих и отраженных ударных волн.

Скорость соударения пластин зависит от зазора h . Если $h = 0$, то $V_n = 0$ и сварка, как правило, не происходит. Зазор h не должен быть меньше 2... 3 мм. Большой зазор h ухудшает качество соединения, а при очень большом зазоре сварка вообще не происходит.

Соединяемые поверхности перед сваркой необходимо тщательно очистить от органических загрязнений, так как их вредное влияние полностью не устраняется ни кумулятивной струей, ни вакуумной сдвиговой деформацией при соударении пластин.

Исследование влияния начальных параметров режима сварки (D , h , r) на качество соединения пластин из низкоуглеродистой и хромоникелевой сталей показало, что по мере возрастания значения аргумента в функции $\sigma_{отр} = f(D, h, r)$ можно выделить три области: с низкой прочностью (ориентировочно $D < 1\ 800$ м/с; $h < 3 \dots 5$ мм; $r < 1,1$); с оптимальной прочностью и бездефектной структурой соединения ($D = 2\ 000 \dots 3\ 000$ м/с; $h = 5 \dots 12$ мм; $r = 1,1 \dots 1,5$), с повышенной прочностью в результате наклепа свариваемых поверхностей, но с наличием дефектов и трещин ($D > 3\ 000$ м/с; $h \gg 12$ мм; $r > 1,6$). Выбор режимов сварки зависит от характеристик прочности и структуры соединения (отсутствия трещин и нарушений конфигурации).

Одним из основных условий, во многом определяющих качество соединения, является постоянство зазора h . При $h = 0$ сварка практически невозможна. Особенно актуально это условие при плакировании больших поверхностей тонкими листами (1 ... 5 мм). Постоянство зазора h может быть обеспечено подвешиванием верхнего листа на тесемках и проволоке, использованием металлических шариков, прокладок, спиралей, тонких металлических гофрированных пластинок, нанесением острых зубцов на поверхности одной из поверхностей (механической обработкой). Широкое практическое применение при плакировании крупногабаритных листов получили V-образные металлические опоры, изготовленные из листа толщиной 0,1 ... 0,2 мм. Зазор h между пластинами перед началом процесса может быть создан за счет нагнетания между ними сжатого газа (избыточное давление 4 ... 10 Па), не вступающего в химическое взаимодействие с металлами свариваемых пластин, но в таком случае затруднена герметизация зазора.

Для повышения жесткости свариваемых тонких металлических пластин (листов фольги), необходимой для создания и поддержания постоянства зазора h , их необходимо прикрепить любым способом (например, точечной сваркой) к дополнительной металлической пластине. А чтобы они не сварились между собой при взрыве, между ними наносится тонкий слой смазочного материала.

Поверхность плакирующего листа, находящегося в контакте с зарядом ВВ, может повреждаться вследствие бризантного (детонационного) действия заряда. Для защиты поверхности между зарядом и плакирующим листом помещается буферный слой (например, из полиэтилена, линолеума, резины).

Сварка взрывом дает возможность сваривать пластины практически из любых металлов. Однако последующий нагрев полученных соединений может вызвать интенсивную диффузию в зоне

соединения и образование интерметаллидных фаз, которые приводят к снижению прочности соединения (а при достаточно высоких температурах она может снизиться практически до нуля).

Для предотвращения этих явлений сварка взрывом проводится через промежуточные прослойки из металлов, не образующих химических соединений с материалами свариваемых пластин. Например, при сварке пластин из титана с пластинами из стали в качестве промежуточного материала используются ниобий, ванадий или тантал.

Сварка взрывом применяется для плакирования стержней и внутренних поверхностей труб и цилиндрических конструкций (рис. 4.20).

При плакировании взрывом стержней гильза 1 устанавливается с зазором на стержень 2. Внутренняя поверхность гильзы и наружная поверхность стержня должны быть механически обработаны и обезжирены. На наружной поверхности гильзы помещается внешний заряд взрывчатого вещества 3, который инициируется (возбуждается) по всему сечению одновременно так, чтобы взрыв распределялся по заряду параллельно его оси. Для создания такого фронта распространения взрыва используется конус из ВВ с детонатором 4 в вершине. Для изоляции зазора от продуктов детонации и центрирования трубы относительно стержня в верхней ее части устанавливается металлический конус 5. Толщина плакирующей

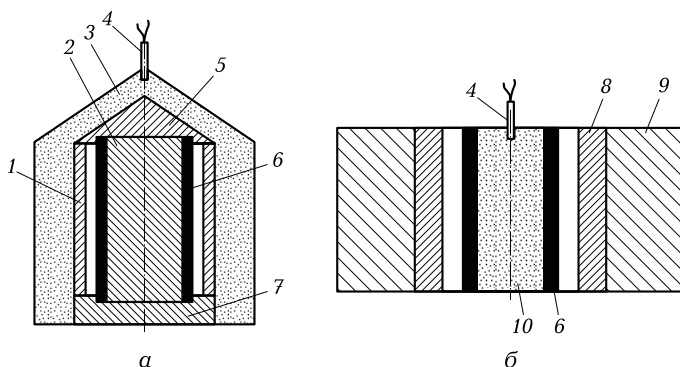


Рис. 4.20. Схема плакирования взрывом стержня (а) и внутренней поверхности трубы (б):

1 — гильза; 2 — стержень; 3 — внешний заряд взрывчатого вещества; 4 — детонатор; 5 — металлический конус; 6 — плакирующая труба; 7 — основание; 8 — обрабатываемая труба; 9 — массивная матрица; 10 — внутренний заряд взрывчатого вещества

трубы 6 может быть 0,5... 15 мм, а диаметр теоретически не ограничивается.

Плакирование внутренней поверхности трубы выполняется по схеме, предусматривающей размещение обрабатываемой трубы 8 в массивной матрице 9. Внутри обрабатываемой трубы 8 с зазором устанавливается плакирующая труба 6 с внутренним зарядом взрывчатого вещества 10, инициируемого детонатором 4.

Для плакирования внутренних поверхностей крупногабаритных труб и цилиндрических конструкций ответственного назначения вместо массивной матрицы 9 используется дополнительный заряд ВВ, расположенный на наружной поверхности обрабатываемого цилиндра и взрывааемый одновременно с внутренним зарядом 10.

Для соединения тонких листов внахлестку эффективно используется точечная сварка взрывом. Свариваемые листы собираются на опоре. На верхний лист через буферную прокладку устанавливается цилиндрический заряд ВВ, взрывааемый детонатором. После взрыва образуется соединение в виде кольца.

При сварке взрывом применяются заряды ВВ массой от нескольких граммов до сотен килограммов. Большая часть энергии, выделяющейся при взрыве, передается в окружающую среду в виде воздушных ударных волн, сейсмических возмущений, разлета осколков. Воздушная ударная волна — наиболее опасный из поражающих факторов взрыва, чем обусловлено проведение сварки взрывом на полигонах (открытых и подземных), удаленных на значительные расстояния от жилых и промышленных объектов, и во взрывных камерах.

Преимуществом работы на открытых полигонах является возможность сварки взрывом конструкций практически неограниченных габаритов.

Открытый полигон представляет собой площадку, специально оснащенную для проведения взрывов, имеющую укрытия для тихоходной техники и персонала во время взрыва, склад взрывчатых материалов и железнодорожную ветку. Вся подготовка деталей к сварке взрывом (зачистка, мойка, сборка в пакеты) проводится в цехе. Собранные пакеты железнодорожным транспортом доставляются на разгрузочные площадки полигона, а оттуда автотранспортом — к месту взрыва. После сварки взрывом по той же цепочке, но детали в обратном порядке доставляются в цех, где проходят контроль и, при необходимости, термическую обработку. Иногда цех для подготовки деталей к взрыву находится на полигоне. При проведении работ в полевых условиях возможно попадание на свариваемые поверхности песка, пыли, влаги, что отрицательно сказыв-

ваются на качестве соединения. Определенные трудности представляет раскладка сыпучих ВВ при ветре и осадках. В условиях отрицательных температур возможно разрушение деталей вследствие снижения ударной вязкости металлов.

Некоторые преимущества есть у подземных полигонов: возможность выполнения работы вне зависимости от погодных условий, гарантированная локализация поражающих факторов взрыва. Взрывные камеры устраиваются в горных породах высокой прочности и имеют габаритные размеры $5,4 \dots 8,0 \times 3,5 \dots 3,8 \times 2,5 \dots 2,8$ м. Для хранения материалов, деталей и готовой продукции на полигоне оборудуются склады, расположенные в 100 м от взрывных камер. Листы основания в сборе с листами облицовки, на которые уложен заряд ВВ, подаются в камеру специальной массивной платформой по железнодорожным путям, снабженным устройством для амортизации удара в момент взрыва. После взрыва и продувки камеры для удаления газообразных продуктов детонации платформа со сваренной деталью выкатывается из тоннеля.

Недостатками подземных полигонов являются ограниченные размеры свариваемых деталей, повышенная влажность воздуха, возможность разрушения камер от систематических взрывов, высокая себестоимость продукции.

Для локализации поражающих факторов взрыва применяются замкнутые бетонные конструкции, как правило, углубленные в землю. Например, в США используются железобетонные камеры диаметром 12 м, высотой 8 м при толщине стенки 0,61 м. Камера рассчитана на заряд ВВ массой до 23 кг. Взрыв производится на стальной плите размером $2,4 \times 1,8 \times 1,5$ м.

Более перспективный способ локализации поражающих факторов взрыва — проведение сварки взрывом в металлических взрывных камерах: цилиндрических (с горизонтальным и вертикальным расположением оболочки) и сферических. Сферические взрывные камеры диаметром 10,5 м с толщиной стенки 20 мм изготавливаются из стали 09Г2С и рассчитаны на заряд ВВ массой до 50 кг.

На качество сварного соединения существенно влияет опора, на которой устанавливается деталь. Главное требование к опоре — долговечность при сохранении способности надежно отводить ударные волны и обеспечивать минимальные остаточные деформации деталей. Опора должна быть пригодной для размещения на ней деталей разной формы и размеров и обладать несжимаемостью, которая обеспечивает обрезание краевых свесов плакирующего листа и предотвращает углубление в нее деталей. Вспомогательные работы могут быть механизированы и автоматизированы

при условии надежного закрепления деталей на опоре, чтобы опора не сбросила их во время взрыва.

Наиболее распространенными являются опоры из грунтово-песчаных смесей, щебня, металла, резины и металла, железобетона, металлической дроби. Недостатками грунтово-песчаных опор являются значительные остаточные деформации деталей и краевые непровары (при сварке изделий толщиной менее 10 мм). Целнометаллические опоры недолговечны и не позволяют сваривать детали сложной формы. Эффективно используются резинометаллические опоры, представляющие собой набор металлических листов, разделенных резиной. Однако верхний лист металла быстро теряет форму. Железобетонные опоры позволяют сваривать детали сложной формы, но являются одноразовыми и, следовательно, дорогостоящими.

Наиболее полно всем требованиям удовлетворяют опоры из металлической дроби: они удобны в обслуживании и надежны в работе. Материал дроби выбирается из условия близости по физико-механическим свойствам к материалу свариваемой детали. Такие опоры имеют самые разные конструкции и выбираются в зависимости от назначения. При сварке взрывом листов толщиной менее 10 мм на опорах из металлической дроби емкость с дробью рекомендуется заполнять жидкостью: в силу своей несжимаемости жидкость принимает на себя значительную часть импульса от взрыва, за счет чего снижается давление дроби в зоне ее контакта со свариваемыми листами и уменьшаются остаточные деформации.

Магнитно-импульсная сварка. Магнитно-импульсная сварка металлов основана на использовании сил электромеханического взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в стенках свариваемой детали при пересечении их силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля, и самим магнитным потоком. При этом электрическая энергия непосредственно преобразуется в механическую, и импульс давления магнитного поля действует на деталь без участия какой-либо передающей среды.

В установку для магнитно-импульсной сварки (рис. 4.21) входят зарядное устройство 5, состоящее из высоковольтного трансформатора и выпрямителя; коммутирующее устройство 3, включающееся при подаче поджигающего импульса на вспомогательный электрод и вызывающее разряд батареи 4 высоковольтных конденсаторов на плоский индуктор 2. Свариваемые детали 1 и 7 устанавливаются внахлестку под углом α друг к другу с зазором δ между ними. Индуктор 2 устанавливается на поверхности, проти-

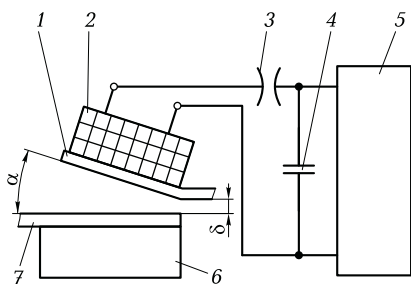


Рис. 4.21. Принципиальная схема установки для магнитно-импульсной сварки:

1, 7 — свариваемые детали; 2 — плоский индуктор; 3 — коммутлирующее устройство; 4 — батарея высоковольтных конденсаторов; 5 — зарядное устройство; 6 — опора; α — установочный угол между деталями; δ — начальный зазор между деталями

ра в направлении неподвижной детали 7. При соударении деталей в зоне их контакта развиваются высокие давления и образуется сварное соединение.

При магнитно-импульсной сварке давление на метаемую деталь передается мгновенно (со скоростью распространения магнитного поля) и движение сообщается не отдельным участкам, как при сварке взрывом, а всей метаемой детали. Для обеспечения последовательного перемещения зоны контакта при сварке детали устанавливаются свариваемыми поверхностями под углом друг к другу, метаемую деталь перед сваркой обрабатывают «на ус». Соединение, как и при сварке взрывом, образуется в результате косо-го соударения свариваемых поверхностей. При этом создаются условия для очистки их от оксидных пленок и загрязнений кумулятивной струей и интенсивной пластической деформации поверхностей с образованием между ними металлических связей.

Формирование сварного соединения возможно и между параллельно расположенными поверхностями. При этом вследствие рассеяния магнитного поля на концах индуктора давление вдоль образующей метаемой детали распределяется неравномерно — оно меньше на концах и больше в средней части. При таком нагружении первоначально прямолинейная метаемая деталь, перемещаясь в зону взаимодействия с неподвижной деталью, к моменту встречи становится выпуклой, и плоское соударение переходит в косое,

воположной свариваемой. Для предотвращения перемещения при сварке деталь 7 жестко закрепляется на опоре 6. Закрепление детали 1 должно обеспечить перемещение ее свариваемого конца в направлении детали 7. При разрядке батареи конденсаторов в зазоре между индуктором и деталью возникает сильное магнитное поле, индуктирующее ток в этой детали. Взаимодействие тока индуктора с индуктированным в детали током приводит к возникновению сил отталкивания между индуктором 2 и деталью 1, вследствие чего эта деталь с большой скоростью перемещается от индукто-

распространяющееся (в общем случае) в двух противоположных направлениях от зоны начального контакта.

Существуют три схемы магнитно-импульсной сварки: при обжатии трубчатых деталей с использованием индуктора, охватывающего деталь; при раздаче трубчатых деталей с использованием индуктора, помещенного внутрь детали; при деформировании листовых заготовок плоским индуктором. Две основные схемы приведены на рис. 4.22. Для предотвращения деформации тонкостенных элементов в процессе сварки внутрь детали (трубы) вставляют металлическую оправку, удаляемую после сварки.

Процесс сварки можно регулировать с помощью основных динамических параметров сварки: скорости V соударения поверхностей, скорости V_k движения фронта контакта и угла γ соударения поверхностей.

Скорость V соударения деталей определяется давлением магнитного поля на метаемую деталь, характером его распределения и ча-

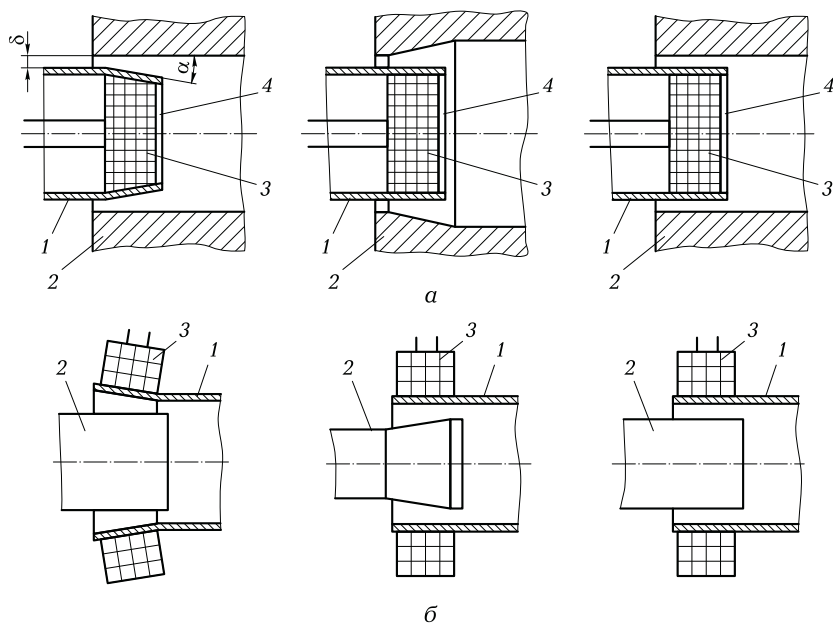


Рис. 4.22. Основные схемы магнитно-импульсной сварки:

a — при обжатии трубчатых деталей с использованием индуктора, охватывающего деталь; *б* — при раздаче трубчатых деталей с использованием индуктора, помещенного внутрь детали; 1, 2 — свариваемые детали; 3 — индуктор; 4 — металлическая оправка, удаляемая после сварки

стотой изменения, геометрическими размерами метаемой детали, физико-механическими характеристиками материала, начальным зазором δ между свариваемыми деталями и установочного угла α между ними.

Скорость V_k перемещения контакта между деталями связана со скоростью V соударения деталей и углом γ соударения деталей зависимостью

$$V_k = V / \sin \gamma. \quad (4.10)$$

Скорость V при сварке изменяется по длине метаемой детали, вместе с тем происходит изменение угла γ соударения деталей и, как следствие, изменение скорости V_k .

Действие импульсного магнитного поля на метаемую деталь зависит от длины и числа витков индуктора, напряжения разряда, емкости батареи конденсаторов, энергии разряда, индуктивности и активного сопротивления разрядного контура, площади внутренней поверхности индуктора в поперечном сечении.

При магнитно-импульсной сварке воздействие магнитного поля на ускоряемую деталь ограничено временем ее перемещения до встречи с неподвижной свариваемой поверхностью. В течение этого времени метаемой детали передается вся энергия, необходимая для сварки. Вследствие малого времени ускорения детали возникает необходимость повышения мощности разряда. Однако при этом возникают и ограничения этого повышения, связанные с прочностью индукторов, воспринимающих те же давления, что и деформируемая деталь, и ее нагревом при большой плотности тока.

Индуктор обычно состоит из токоподводящей спирали, токоподводов, изоляции и элементов механического усиления. Главный элемент индуктора — токоподводящая одно- или многovitковая спираль, служащая для образования импульсного магнитного поля с заданными параметрами. Форма рабочей поверхности спирали с эквидистантным зазором повторяет форму метаемой детали.

Индукторы с одновитковой спиралью значительно прочнее и проще в изготовлении, чем с многovitковой. Однако вследствие их малой индуктивности целесообразнее использовать более сложные высокочастотные магнитно-импульсные установки. Спирали индукторов могут быть навиты из ленты или выточены из цельной заготовки. Применяются также и охлаждаемые индукторы, в которых охлаждающая среда пропускается через специальные каналы.

Стойкость индуктора зависит от качества изоляции. В индукторе применяется главная (изолирующая индуктор от заготовки) и межвитковая изоляции. В качестве изоляции используются армированный стеклопластик с пропиткой (например, эпоксидной смолой), пленки полиэтилена, фторопласта, лавсана.

Индукторы изготавливаются из меди и ее сплавов. Индукторы для получения сверхсильных полей изготавливают из тантала — наиболее перспективного материала.

Ограниченные размеры и недостаточная прочность индукторов не позволяют применять магнитно-импульсную сварку для получения соединений большой площади. Этот способ обычно применяют для сварки всевозможных трубчатых деталей между собой и с другими деталями, а также плоских деталей по наружному и внутреннему контуру. Магнитно-импульсным способом можно сваривать детали практически из любых однородных и разнородных материалов. Диапазон толщины метаемых деталей составляет 0,5... 2,5 мм.

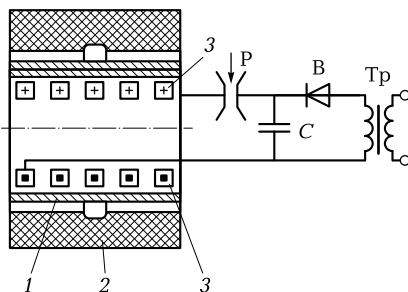
В приборостроении, авиационной и космической промышленности широко применяются тонкостенные оболочковые детали, которые затруднительно, а иногда и невозможно получить традиционными методами многопереходной штамповки тонколистовых материалов. Пайка требует использования дорогостоящей оснастки и дефицитных припоев. Дорогостоящая и трудоемкая в изготовлении оснастка необходима также для жесткого позиционирования при контактной и лазерной сварке тонколистовых деталей сравнительно простой формы. Для формовки и сварки тонколистовых деталей такого типа успешно используется энергия импульсных полей.

Принципиальная схема совмещенной контактной сварки-формовки (МИКСФ) приведена на рис. 4.23.

Суть МИКСФ заключается в следующем. Фольга 1, свернутая с образованием нахлесточного соединения, устанавливается в ди-

Рис. 4.23. Принципиальная схема МИКСФ:

1 — фольга; 2 — диэлектрическая разъемная матрица; 3 — индуктор; P — разрядник; В — выпрямитель; С — конденсатор; Тр — трансформатор



электрическую разъемную матрицу 2, имеющую форму будущей конструкции. Внутри детали расположен рабочий инструмент — индуктор 3. В процессе разряда емкостной батареи конденсаторов по виткам индуктора протекает индуцированный ток $I_{ин}$, направление линий которого в первый полупериод обозначено на схеме символом (+), второй полупериод — символом (?). Переменный магнитный поток тока $I_{ин}$ обуславливает вихревые токи в детали. Силовые линии индуцированного тока $I_{ин}$ направлены по периметру детали, поэтому при прохождении его через нахлесточное соединение в оболочке выделяется джоулева теплота.

При определенных значениях вихревых токов происходит подплавление сопрягаемых поверхностей соединения. В то же время взаимодействие магнитного поля индуктора с вихревыми токами в оболочке приводит к возникновению магнитного давления по всей ее поверхности. В результате совместного воздействия давления и теплоты с подплавлением сопрягаемых поверхностей образуется сварное соединение по типу контактной электрической сварки с оплавлением сопрягаемых поверхностей. Одновременно со сваркой идет формовка заданной конструкции в соответствии с конфигурацией матрицы.

В процессе формообразования предварительно сжатые поверхности нахлесточного соединения сдвигаются относительно друг друга. В результате разрушаются сплошности оксидной пленки, что способствует более надежному сплавлению свариваемых поверхностей.

Процесс МИКСФ обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями изготовления оболочковых деталей:

- значительное упрощение маршрутной технологии за счет исключения ряда операций; при этом детали изготавливаются в одной установке;
- возможность регулирования (дозирования) в широком диапазоне и с большой точностью подводимой энергии;
- возможность автоматизации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сварка давлением?
2. Перечислите основные разновидности сварки давлением.

3. Какова природа образования соединения при сварке давлением?
4. За счет чего образуются активные центры при сварке давлением?
5. Каковы стадии образования соединения при сварке давлением?
6. Какие процессы могут протекать на стадии образования сварного соединения?
7. В чем состоит проблема физического контактирования?
8. Что означает термин «вынужденная деформация»?
9. Перечислите способы сварки давлением с нагревом.
10. В чем состоит суть кузнечной сварки?
11. В чем состоит суть УЗС?
12. Каковы основные свойства ультразвука, используемые при УЗС?
13. В чем состоят достоинства УЗС?
14. Каковы основные параметры режима УЗС?
15. Каковы области применения УЗС?
16. В чем состоит суть классической сварки трением и инерционной сварки?
17. В чем состоят преимущества сварки трением по сравнению с другими способами?
18. В чем заключается подготовка деталей к сварке трением?
19. Где применяется сварка трением?
20. Что такое газопрессовая сварка?
21. Какой процесс называется высокочастотной сваркой?
22. Каковы основные способы сварки давлением без нагрева?
23. Что такое холодная сварка?
24. В чем заключаются достоинства и недостатки холодной сварки?
25. Каковы основные области применения холодной сварки?
26. В чем состоят особенности подготовки деталей к холодной сварке?
27. Каковы основные параметры режима холодной сварки?
28. Перечислите разновидности способов холодной сварки.
29. В чем состоит суть сварки взрывом?
30. В чем состоят достоинства сварки взрывом?
31. В чем состоит суть магнитно-импульсной сварки?
32. В чем заключается суть диффузионной сварки?
33. В чем состоят достоинства диффузионной сварки?
34. В чем заключаются недостатки диффузионной сварки?
35. Почему диффузионная сварка обеспечивает высокую точность размеров сваренных деталей?
36. Как готовятся детали к диффузионной сваркой?
37. Каковы параметры режима диффузионной сварки?

38. Из чего состоят установки для диффузионной сварки?
39. Какие способы нагрева деталей применяются при диффузионной сварке?
40. Для чего нужен вакуум при диффузионной сварке?
41. Можно ли производить диффузионную сварку без вакуума?
42. Какие дефекты сварных соединений бывают при диффузионной сварке?
43. Как контролируются соединения, выполненные диффузионной сваркой?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вавилов А. Ф.* Сварка трением / А. Ф. Вавилов, В. П. Воинов. — М. : Машиностроение, 1964. — 155 с.
2. *Виль В. И.* Сварка металлов трением / В. И. Виль. — Л. : Машиностроение, 1970. — 175 с.
3. *Волков С. С.* Особенности конструирования изделий из пластмасс, изготовляемых с применением ультразвуковой сварки // Сварочное производство, 1999. — № 5. — С. 26—29.
4. *Гельман А. С.* Основы сварки давлением / А. С. Гельман. — М. : Машиностроение, 1970. — 312 с.
5. *Дудин А. А.* Магнитно-импульсная сварка металлов / А. А. Дудин. — М. : Машиностроение, 1979. — 128 с.
6. *Кабанов Н. С.* Сварка на контактных машинах / Н. С. Кабанов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1973. — 255 с.
7. *Казаков Н. Ф.* Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. — М. : Машиностроение, 1976. — 312 с.
8. *Канон Ю. А.* Сварка взрывом / Ю. А. Канон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. — М. : Машиностроение, 1987. — 216 с.
9. *Каракозов Э. С.* Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. — М. : Металлургия, 1976. — 263 с.
10. *Каракозов Э. С.* Сварка металлов давлением / Э. С. Каракозов. — М. : Машиностроение, 1986. — 276 с.
11. *Нефёдов Б. Б., Лялякин В. П.* Развитие плазменной сварки-наплавки за рубежом // Сварочное производство, 1998. — № 3. — С. 21—27.
12. *Николаев Г. А.* Специальные методы сварки / Г. А. Николаев, Н. А. Ольшеванский. — М. : Машиностроение, 1975. — 231 с.
13. *Петрунин И. Е.* Физико-химические процессы при сварке / М. Е. Петрунин. — М. : Высш. шк., 1972. — 280 с.
14. *Сахацкий Г. П.* Технология сварки металлов в холодном состоянии / Г. П. Сахацкий. — Киев : Наукова думка, 1979. — 295 с.
15. Сварка трением : справочник / под ред. В. К. Лебедева, И. А. Черненко, В. И. Биляя. — Л. : Машиностроение, 1987. — 236 с.
16. Сварка в машиностроении: справочник : в 4 т. — Т. 1 / под ред. Н. А. Ольшеванского. — М. : Машиностроение, 1978. — 504 с.
17. Сварка в машиностроении : справочник : в 4 т. — Т. 2 / под ред. А. И. Акулова. — М. : Машиностроение, 1978. — 462 с.
18. *Стрижаков Е. Л., Глинберг А. Д., Карандашев Н. А.* и др. Магнитно-импульсная контактная сварка-формовка оболочковых конструкций // Сварочное производство, 2000. — № 11. — С. 37—39.

19. Технологические основы сварки и пайки в авиастроении / [В. А. Фролов, В. В. Пешков, А. Б. Коломенский, В. А. Козаков]. — М. : Интернет инжиниринг, 2002. — 455 с.

20. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патона. — М. : Машиностроение, 1974. — 768 с.

21. *Холопов Ю. В.* Ультразвуковая сварка / Ю. В. Холопов. — Л. : Машиностроение, 1972. — 152 с.

22. *Шамов А. Н.* Высокочастотная сварка металлов / А. Н. Шамов, И. В. Лунин, В. Н. Иванов. — Л. : Машиностроение, 1977. — 198 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Традиционные способы сварки плавлением.....	5
1.1. Газопламенная сварка.....	5
1.2. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами.....	18
1.3. Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса.....	30
1.4. Дуговая сварка в среде защитных газов.....	41
1.5. Дуговая сварка порошковой проволоки.....	60
1.6. Электрошлаковая сварка.....	62
Глава 2. Специальные способы сварки плавлением.....	73
2.1. Плазменная сварка.....	73
2.2. Электронно-лучевая сварка.....	89
2.3. Лазерная сварка.....	99
2.4. Сварка световым лучом.....	109
Глава 3. Контактная сварка.....	116
3.1. Основные сведения о контактной сварке.....	116
3.2. Шовная сварка.....	123
3.3. Стыковая сварка.....	125
3.4. Точечная сварка.....	130
Глава 4. Специальные способы сварки давлением.....	135
4.1. Особенности сварки давлением.....	135
4.2. Сварка давлением с нагревом.....	137
4.3. Сварка давлением без нагрева.....	177
Список литературы.....	201

Учебное издание

Овчинников Виктор Васильевич
Современные виды сварки

Учебное пособие

5-е издание, стереотипное

Редактор *В. А. Жиганов*
Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*
Компьютерная верстка: *Д. В. Федотов*
Корректор *О. В. Попова*

Изд. № 705214216. Подписано в печать 21.11.2016. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Балтика». Усл. печ. л. 13,0.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.
Тел./факс: (495)648-0507, 616-0029.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU.ПЩ01.Н00695 от 31.05.2016.



Издательский центр «Академия»

*Учебная литература
для профессионального
образования*

Наши книги можно приобрести (оптом и в розницу)

Москва:

129085, Москва, пр-т Мира, д. 101в, стр. 1
(м. Алексеевская)
Тел.: (495) 648-0507, факс: (495) 616-0029
E-mail: sale@academia-moscow.ru

Филиалы:

Северо-Западный

194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная,
д. 14, оф. 319
Тел./факс: (812) 244-9253
E-mail: spboffice@acadizdat.ru

Приволжский

603101, Нижний Новгород, пр. Молодежный,
д. 31, корп. 3
Тел./факс: (831) 259-7431, 259-7432, 259-7433
E-mail: pf-academia@bk.ru

Уральский

620142, Екатеринбург, ул. Чапаева, д. 1а, оф. 12а
Тел.: (343) 257-1006
Факс: (343) 257-3473
E-mail: academia-ural@mail.ru

Сибирский

630007, Новосибирск, ул. Кривощёвская, д. 15, корп. 3
Тел./факс: (383) 362-2145, 362-2146
E-mail: academia_sibir@mail.ru

Дальневосточный

680038, Хабаровск, ул. Серышева, д. 22, оф. 519, 520, 523
Тел./факс: (4212) 56-8810
E-mail: filialdv-academia@yandex.ru

Южный

344082, Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, д. 10/65
Тел.: (863) 203-5512
Факс: (863) 269-5365
E-mail: academia-UG@mail.ru

Представительства:

в Республике Татарстан

420034, Казань, ул. Горсоветская, д. 17/1, офис 36
Тел./факс: (843) 562-1045
E-mail: academia-kazan@mail.ru

в Республике Казахстан

Алматы, пр-т Абая, д. 26А, оф. 209
Тел.: (727) 250-0316, моб.тел.: (701) 014-3775
E-mail: academia_kazakhstan@mail.ru

в Республике Дагестан

Тел.: 8-928-982-9248

www.academia-moscow.ru



Издательский центр «Академия»

*Учебная литература
для профессионального
образования*

**Предлагаем
вашему вниманию
следующие книги:**

В. С. ВИНОГРАДОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Объем 320 с.

В учебнике приведены сведения об основных видах и технологии электрической дуговой сварки, а также сварочных материалах и применяемом оборудовании. Охарактеризованы особенности сварки конструкционных материалов различных групп и изготовления сварных металлоконструкций. Рассмотрены виды дефектов и способы контроля сварных швов и соединений, а также вопросы охраны труда и экологии.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

Н. А. ЮХИН

ГАЗОСВАРЩИК

Объем 160 с.

В учебном пособии изложены квалификационные требования и правила безопасного ведения газосварочных работ, приведены марки и характеристики сварочных материалов, конструктивные особенности оборудования и аппаратуры. Рассмотрены физико-химические процессы при газовой сварке, технологические особенности и приемы сварки различных металлов. Описаны дефекты сварных швов и соединений, способы их обнаружения и устранения.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезно для ускоренной профессиональной подготовки газо-

и электрогазосварщиков на производстве, в учебных центрах и комбина-
тах, осуществляющих обучение лиц, не имеющих профессии, в том числе
по линии службы занятости населения.

Л. Н. ГУСЬКОВА

ГАЗОСВАРЩИК: РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

Объем 96 с.

В рабочей тетради отражены основные темы курса «Газовая сварка»,
изучаемые при подготовке газосварщиков. Представленный материал по-
вышает интерес к предмету, развивает мышление, помогает более эффек-
тивно закрепить знания и способствует лучшему усвоению предмета. Тет-
радь предназначена для самостоятельных занятий и проведения контроля
знаний студентов по каждой теме предмета.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

В. Н. ГАЛУШКИНА

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ: РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

Объем 96 с.

Рабочая тетрадь предназначена для изучения предмета «Технология
производства сварных конструкций» и является частью учебно-методиче-
ского комплекта по профессии «Сварщик». В рабочей тетради отражены
темы для закрепления теоретических знаний и практических навыков, по-
лученных при изучении технологии производства сварных конструкций.
Представленные задания помогают развивать мышление, прививают уме-
ние самостоятельно получать необходимые знания с помощью справочной
литературы.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

В. Н. ГАЛУШКИНА

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Объем 192 с.

Учебник предназначен для изучения предмета «Технология производ-
ства сварных конструкций» и является частью учебно-методического комп-
лекта по профессии «Сварщик». Рассмотрен технологический процесс из-
готовления сварных конструкций. Даны характеристики различных видов

www.academia-moscow.ru

сварки, классификация сварных швов и соединений. Представлено оборудование для осуществления заготовительных работ, сборочное и сварочное оборудование. Уделено внимание контролю качества сварных соединений. Описаны методы расчета на прочность типовых сварных строительных конструкций.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

С. А. ЛАВРЕШИН

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБУЧЕНИЕ ГАЗОСВАРЩИКОВ

Объем 240 с.

В учебном пособии изложены теоретические основы газовой сварки и пайки металлов. Приведены свойства металлов и их сплавов, классификация и маркировка углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных металлов и их сплавов. Подробно рассмотрены устройство и правила эксплуатации газосварочного оборудования, технологические особенности процесса сварки и пайки. Указаны требования, предъявляемые к оборудованию поста газопламенной обработки металлов и сварочным материалам, причины, вызывающие дефекты в сварных швах, способы их обнаружения и исправления. Особое внимание уделено вопросам охраны труда, правилам пожарной безопасности при выполнении газосварочных работ.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

М. А. ГУРЕЕВА

ОСНОВЫ ЭКОНОМИКИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Объем 208 с.

Учебник предназначен для изучения предмета «Экономика отрасли и предприятия» и является частью учебно-методического комплекта по дисциплинам отраслевого цикла для профессий машиностроения и металлообработки. Изложены основы экономики машиностроения. Рассмотрены факторы производства и показатели их использования, сущность и виды планирования, анализ, экономические показатели и финансовые результаты хозяйственной деятельности машиностроительного предприятия. Особое внимание уделено деятельности предприятия в условиях рыночной экономики.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.