

О. И. СТЕКЛОВ

ОСНОВЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета СССР
по профессионально-
техническому образованию
в качестве учебного пособия
для технических училищ

SCANNED AND DJVUED BY
ROMAN EFIMOV

ROMAN@FARLEP.NET

WWW.FARLEP.NET/~ROMAN

15 oct 2003



Москва «Высшая школа» 1981

ББК 34.64
С 79
УДК 621.791

Стеклов О. И.

С 79 Основы сварочного производства: Учеб. пособие для техн. училищ. — М.: Высш. школа, 1981. — 160 с., ил. — (Профтехобразование. Сварка. Резка).

25 к.

В книге изложены основы теории сварки (сущность, классификация, физико-химические процессы, деформации и напряжения, свариваемость металлов), кратко описано устройство оборудования и аппаратуры для дуговой и газовой сварки, наплавки и резки, рассмотрены приемы выполнения различных сварных швов, приведены сведения о перспективных видах сварки, механизации и автоматизации сварочного производства.

С $\frac{31206-056}{052(01)-81}$ 73—81

2704060000

6П4.3

ББК 34.64

ВВЕДЕНИЕ

Сварка является одним из основных технологических процессов в машиностроении и строительстве. Трудно назвать отрасль народного хозяйства, где бы ни применялась сварка. Сварка позволила создать принципиально новые конструкции машин, внести коренные изменения в конструкцию и технологию производства. Поэтому Коммунистическая партия и Советское правительство в своих решениях уделяет серьезное внимание развитию сварки в СССР. По уровню сварочного производства Советский Союз занимает ведущее место среди промышленно развитых стран.

В связи с развитием научно-технической революции резко возрос диапазон свариваемых толщин материалов, видов сварки. В настоящее время сваривают материалы толщиной от нескольких микрон (в микроэлектронике) до нескольких метров (в тяжелом машиностроении). Наряду с традиционными конструкционными сталями сваривают специальные стали и сплавы на основе титана, циркония, молибдена, ниобия и других материалов, а также разнородные материалы.

Существенно расширились условия проведения сварочных работ. Наряду с обычными условиями сварку выполняют в условиях высоких температур, радиации, под водой, в глубоком вакууме, в условиях невесомости. Быстрыми темпами внедряются новые виды сварки — лазерная, электронно-лучевая, ионная, световая, диффузионная, ультразвуковая, электромагнитная, взрывная и др., существенно расширились возможности дуговой и контактной сварки.

Основным средством ускорения научно-технического прогресса и развития общественного производства, направленного на повышение материального и культурного уровня советского народа, является повышение производительности труда и качества работы. В области сварочного производства эта задача решается механизацией и автоматизацией самих сварочных процессов, т. е. переходом от ручного труда сварщика к механизированному, и комплексной механизацией, включающей механизацию подготовительных, сборочных, сварочных и контрольных операций.

Высокий технический уровень сварочного производства предполагает и высокий уровень общеобразовательной и технической подготовки рабочих на производстве. Цель данной книги — помочь учащимся в изучении теоретических основ сварочного производства, которое в сочетании с производственным обучением, полученным в учебных заведениях системы профтехобразования, позволит учащимся стать квалифицированными сварщиками.

Часть I

ОСНОВЫ ТЕОРИИ СВАРКИ

Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ И СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

§ 1. Классификация и сущность сварки, наплавки и термической резки

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

Сущность сварки заключается в сближении элементарных частиц свариваемых частей настолько, чтобы между ними начали действовать межатомные связи, которые обеспечивают прочность соединения.

Так как свариваемые поверхности неоднородны, имеют макро- и микронеровности, окисные пленки, загрязнения, то для сварки необходимо приложить внешнюю энергию. В зависимости от вида энергии различают три класса сварки: термический, термомеханический и механический.

К термическому классу относятся виды сварки, осуществляемой плавлением, т. е. местным расплавлением соединяемых частей с использованием тепловой энергии: дуговая, газовая, электрошлаковая, электронно-лучевая, плазменно-лучевая, термитная и др.

Дуговая сварка — сварка плавлением, при которой нагрев осуществляют электрической дугой. Особым видом дуговой сварки является *плазменная сварка*, при которой нагрев осуществляют сжатой дугой.

Газовая сварка — сварка плавлением, при которой кромки соединяемых частей нагревают пламенем газов, сжигаемых на выходе горелки для газовой сварки.

Электрошлаковая сварка — сварка плавлением, при которой для нагрева металла используют тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через расплавленный электропроводный шлак.

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

Местное расплавление соединяемых частей при *лазерной сварке* осуществляют энергией светового луча, полученного оптического квантового генератора — *лазера*.

При термитной сварке используют тепло, образующееся в результате сжигания термит-порошка, состоящего из смеси алюминия и окиси железа.

К термомеханическому классу относятся виды сварки, при которых используется тепловая энергия и давление: контактная, диффузионная, газопрессовая, дугопрессовая и др.

Основным видом термомеханического класса является контактная сварка — сварка с применением давления, при которой нагрев осуществляют теплом, выделяемым при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части.

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

При прессовых видах сварки соединяемые части могут нагреваться пламенем газов, сжигаемых на выходе сварочной горелки (газопрессовая сварка), дугой (дугопрессовая сварка), электрошлаковым процессом (шлакопрессовая сварка), индукционным нагревом (индукционно-прессовая сварка), термитом (термитно-прессовая сварка) и т. п.

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

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

Сварка взрывом — сварка, при которой соединение осуществляется в результате вызванного взрывом соударения быстро движущихся частей.

Ультразвуковая сварка — сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний.

Сварка трением — сварка давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызываемым вращением свариваемых частей друг относительно друга.

Наплавка — это нанесение с помощью сварки слоя металла на поверхность изделия. Наплавочные работы выполняют для восстановления размеров изношенных деталей (ремонтная наплавка, восстановительная наплавка) и при изготовлении новых изделий наплавкой на их поверхность слоев металла с особыми свойствами, например с повышенной коррозионной стойкостью, износостойкостью, жаростойкостью, жаропрочностью.

Термическая разделительная резка основана на способности металла сгорать в струе технически чистого кислорода и удалении продуктов сгорания из полости реза. В зависимости от источника тепла, применяемого для резки, различают газовую резку, основанную на использовании тепла газового пламени, дуговую резку расплавлением с использованием тепла электрической дуги, обычно горящей между разрезаемым металлом и

электродом, плазменно-дуговую резку (резку сжатой дугой) — особый вид дуговой резки, основанный на выплавлении металла из полости реза направленным потоком плазмы.

Металл из полости реза в процессе термической резки удаляется: термическим способом за счет расплавления и вытекания металла из полости реза;

химическим способом за счет окисления металла, его превращения в окислы и шлаки, которые также удаляются из полости реза;

механическим способом за счет механического действия струи газа, способствующей выталкиванию жидких и размягченных продуктов из полости реза.

При газовой резке одновременно действуют все три способа, при дуговой и плазменно-дуговой преимущественно термический и механический.

§ 2. Сварные соединения и швы

Сварное соединение — это неразъемное соединение, выполненное сваркой. Сварные соединения могут быть стыковыми, угловыми, тавровыми и нахлесточными (рис. 1).

С т ы к о в ы м называется сварное соединение двух элементов, расположенных в одной плоскости или на одной поверхности.

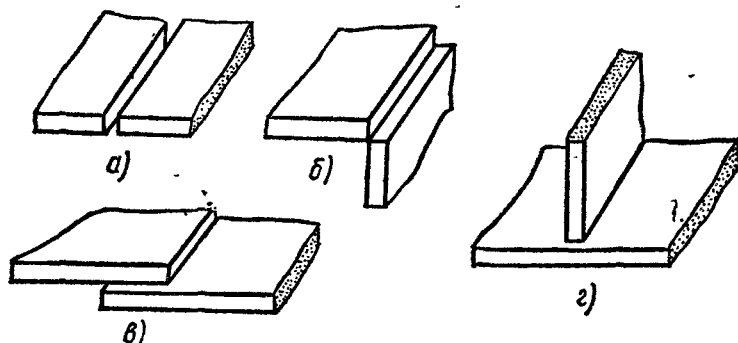


Рис. 1. Сварные соединения:

а — стыковое, *б* — угловое, *в* — нахлесточное, *г* — тавровое

У г л о в ы м называется соединение двух элементов, расположенных под прямым углом и сваренных в месте примыкания их краев.

Н а х л е с т о ч н ы м называется сварное соединение, в котором свариваемые элементы расположены параллельно и перекрывают друг друга.

Т а в р о в ы м называется сварное соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом и приварен торцом другой элемент.

Часть конструкции, в которой сварены примыкающие друг к другу элементы, называется *сварным узлом*.

Примеры сварных соединений, применяемых при основных видах сварки плавлением и давлением, приведены на рис. 2.

Сварной шов — участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации металла сварочной ванны.

	Ручная дуговая	Автоматическая под флюсом	Электронно-лучевая	Контактная		
				стыковая	точечная	шовная
<i>Стыковые</i>	$S=1-3$ 2-6 2-6 60° 3-26	$S=2-70$ 30° $S=5-20$ $15^\circ/2S$ $S=20-60$	$S=1-100$	$\varnothing 2-100$ $\varnothing 5-20$ $\varnothing 2-200$ $\varnothing 5-20$	—	$S=2,5-4$ $2,5-4$ $S=1-3$
	$S=1-12$ 55° $S=12-30$	$S=2-20$ 45° $S=10-60$	$S=5-20$	$\varnothing 2-30$	$S=2-8$ $3-8$ $S=0,5-5$	$S=0,3-3$
	$3S$ $S=2-20$	—	$S=1-100$	—	$S=0,5-5$ $0,5-5$ $S=0,5-5$	$S=0,3-3$ $0,3-3$ $S=0,3-3$
	$S=5-60$ $S=5-60$	—	—	$\varnothing 2-80$	—	$S=0,3+3$

Рис. 2. Виды сварных соединений, применяемых при основных видах сварки плавлением и давлением

Часть сварного шва, находящаяся при сварке в жидком состоянии, называется *сварочной ванной*.

Сварные швы могут быть стыковыми и угловыми (рис. 3). Стыковой шов — сварной шов стыкового соединения.

Угловой шов — сварной шов углового, таврового и нахлесточного соединений.

Сварные швы могут быть непрерывными, прерывистыми, одно- и многослойными, одно- и двусторонними. Сварные швы, применяемые для фиксации взаимного расположения, размеров собираемых под сварку элементов, называются *прихватками*.

На рис. 4 показаны основные положения швов в пространстве.

Для качественного формирования сварного шва делают подготовку кромок под сварку. Элементы геометрической формы подготовки кромок под сварку (рис. 5, а) — угол разделки кромок α , угол скоса одной кромок β , зазор между сваряемыми кромками b , притупление кромки, т. е. нескошенная часть торца кромок c .

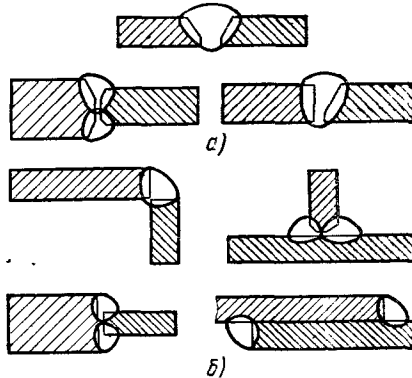


Рис. 3. Сварные швы:
а — стыковые, б — угловые

Элементы геометрической формы сварного шва (рис. 5, б) — ширина шва e , глубина провара h , усиление (ослабление) шва q

В зависимости от конструктивных особенностей изделия и вида сварки к подготовке и сборке деталей предъявляют различные требования.

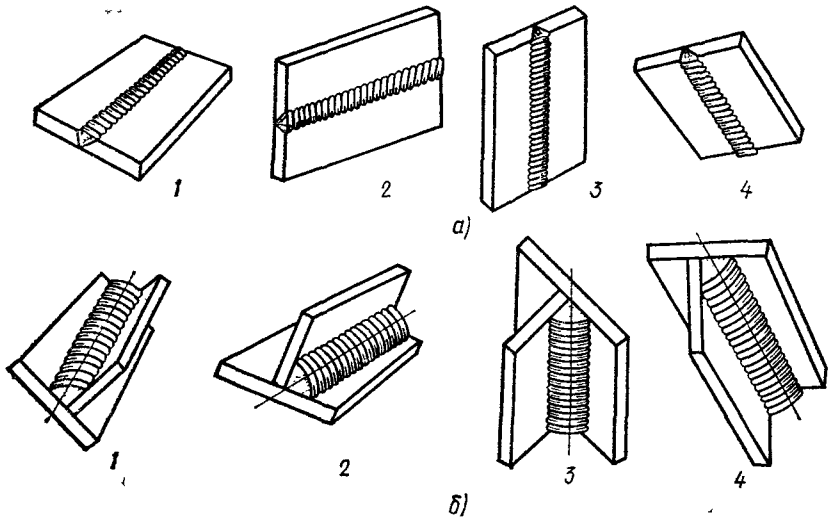
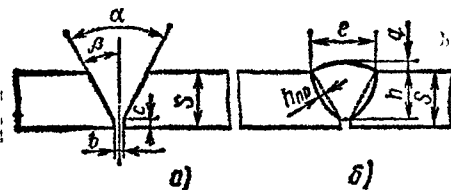


Рис. 4. Пространственное положение сварных швов:

а — стыковые, *б* — угловые, 1 — нижнее положение, 2 — горизонтальное, 3 — вертикальное, 4 — потолочное

Государственные стандарты регламентируют основные типы и конструктивные элементы швов сварных соединений: ГОСТ 5264-69 — для ручной дуговой сварки; ГОСТ 8713-70 — для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом; ГОСТ 14771-76 — для дуговой сварки в защитных газах; ГОСТ 15164-78 — для электрошлаковой сварки; ГОСТ 15878-70 — для контактной сварки и др.

Рис. 5. Элементы геометрической формы подготовленных кромок под сварку (*а*) и выполненного шва (*б*)



ГОСТ 2.312-72 «Единая система конструкторской документации. Условные обозначения и обозначения швов сварных соединений» устанавливает графическое изображение и обозначение сварных швов.

Контрольные вопросы

1. Что называется сваркой?
2. Как классифицируются виды сварки?
3. В чем заключается сущность основных видов сварки?
4. Что называется сварным соединением и сварным швом?
5. В чем заключается сущность разделительной термической резки?

Глава 2. ТЕРМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ПРИ СВАРКЕ

§ 3. Основные термические источники энергии при сварке

Основными термическими источниками энергии (тепла) при сварке плавлением являются сварочная дуга, газовое пламя, лучевые источники энергии и тепло, выделяемое при электрошлаковом процессе.

Термические источники энергии характеризуются температурой источника, степенью сосредоточенности, определяемой наименьшей

1. Энергетические характеристики основных термических источников энергии для сварки и резки

Источники энергии	Температура, °С	Наименьшая площадь нагрева, см ²	Наибольшая плотность энергии в пятне, Вт/см ²
Газовое пламя	3000—3500	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^4$
Дуга в парах металла	4500—6000	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^5$
Дуга в газах	5000—20 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^5$
Микроплазма	—	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$
Электронный луч	—	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^8$
Фотонный луч	—	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^9$

площадью нагрева (пятно нагрева), и наибольшей плотностью в пятне нагрева.

Эти энергетические характеристики (табл. 1) определяют технологические свойства источников нагрева металла при сварке, наплавке и резке.

§ 4. Сварочная дуга

Виды сварочных дуг. Источником теплоты при дуговой сварке является сварочная дуга — устойчивый электрический разряд в сильно ионизированной смеси газов и паров материалов, используемых при сварке, и характеризующийся высокой плотностью тока и высокой температурой.

В зависимости от числа электродов и способов включения электродов и свариваемой детали в электрическую цепь различают следующие виды сварочных дуг (рис. 6):

прямого действия, когда дуга горит между электродом и изделием;

косвенного действия, когда дуга горит между двумя электродами, а свариваемое изделие не включено в электрическую цепь;

трехфазная дуга, возбуждаемая между двумя электродами, а также между каждым электродом и основным металлом.

По роду тока различают дуги, питаемые переменным и постоянным током. При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярности. В первом случае электрод подключается к отрицательному полюсу и служит катодом, а изделие — к положительному полюсу и служит анодом; во втором случае

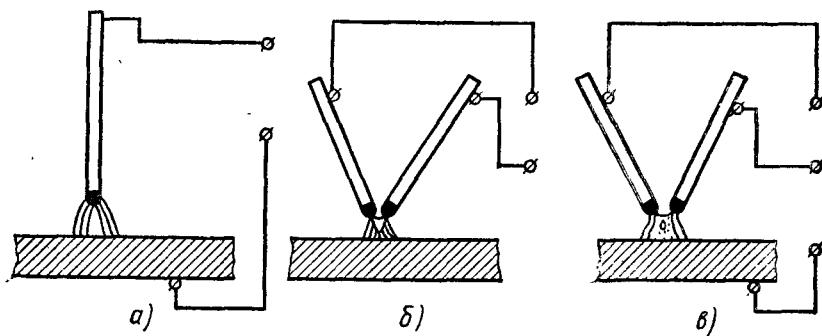


Рис. 6. Виды сварочных дуг:

а — прямого, б — косвенного, в — комбинированного действия (трехфазная)

электрод подключается к положительному полюсу и служит анодом, а изделие — к отрицательному и служит катодом. В зависимости от материала электрода различают дуги между неплавящимися электродами (угольными или вольфрамовыми) и плавящимися металлическими электродами.

Сварочная дуга обладает рядом физических и технологических свойств, от которых зависит эффективность использования дуги для сварки.

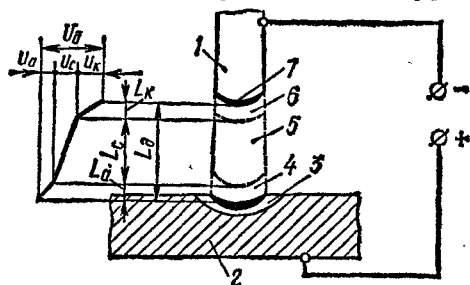


Рис. 7. Схема сварочной дуги и падения напряжения в ней:

1 — электрод, 2 — изделие, 3 — анодное пятно, 4 — анодная область дуги, 5 — столб дуги, 6 — катодная область дуги, 7 — катодное пятно

К физическим свойствам относятся электрические, электромагнитные, кинетические, температурные, световые.

К основным технологическим свойствам относятся: мощность дуги, пространственная устойчивость, саморегулирование.

Электрические свойства дуги. Для образования и поддержания горения дуги необходимо иметь в пространстве между электродами

электрически заряженные частицы — электроны, положительные и отрицательные ионы. Процесс образования ионов и электронов называется *ионизацией*, а газ, содержащий электроны и ионы, ионизированным. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе ее горения.

В дуговом промежутке выделяют следующие области (рис. 7): катодную L_k и анодную L_a , где наблюдается значительное падение напряжения, вызванное образованием около электродов пространственных зарядов (скоплением заряженных частиц), и расположенную между ними область дугового разряда, называемую столбом дуги L_c . На поверхности анода и катода образуются электродные пятна, представляющие собой основания столба дуги, через которые проходит весь сварочный ток. Электродные пятна выделяются яркостью свечения. Общая длина сварочной дуги L_d равна сумме длин всех трех областей: $L_d = L_k + L_c + L_a$, где L_d — общая длина сварочной дуги; L_k — длина катодной области, равная примерно 10^{-2} см; L_c — длина столба дуги; L_a — длина анодной области, равная примерно 10^{-2} — 10^{-4} см.

Общее напряжение сварочной дуги соответственно складывается из суммы падений напряжений в отдельных областях дуги: $U_d = U_k + U_c + U_a$, U_d , U_k , U_c , U_a — соответственно падение напряжения общее на дуге, в катодной области, столбе дуги и анодной области, В.

Зависимость напряжения в сварочной дуге от ее длины описывается уравнением $U_d = a + bL_d$, где a — сумма падений напряжения в прикатодной и прианодной областях, В; L_d — длина столба дуги, мм; b — удельное падение напряжения в дуге, отнесенное к 1 мм столба дуги, В/мм.

Тепловая мощность дуги. Основной характеристикой сварочной дуги как источника энергии для сварки является эффективная тепловая мощность q_n . Эффективная тепловая мощность источника сварочного нагрева — это количество теплоты, введенное в металл за единицу времени и затраченное на его нагрев. Эффективная тепловая мощность является частью общей тепловой мощности дуги q , так как некоторое количество тепла дуги непроизводительно расходуется на теплоотвод в металле, излучение, нагрев капель при разбрызгивании.

Отношение эффективной тепловой мощности к полной тепловой мощности источника теплоты называется эффективным коэффициентом полезного действия (к. п. д.) процесса нагрева $\eta_n = \frac{q_n}{q}$.

Полную тепловую мощность сварочной дуги, т. е. количество теплоты, выделяемое дугой в единицу времени, приближенно считают равной тепловому эквиваленту ее электрической мощности $q = IU_d$, где I — величина сварочного тока, А; U_d — падение напряжения на дуге, В; q — тепловой эквивалент электрической мощности сварочной дуги, Дж/с.

Соответственно, эффективная тепловая мощность определяется выражением $q_n = IU_d \eta_n$.

Значение η_n может меняться от 0,3 до 0,95 и для различных видов сварки ориентировочно составляет: открытая угольная дуга — 0,5—0,65; дуга в аргоне — 0,5—0,6; сварка штучными покрытыми электродами — 0,7—0,85; сварка под флюсом — 0,85—0,93.

Количество тепла, вводимое в металл источником нагрева и отнесенное к единице длины шва, называется погонной энергией свар-

ки. Погонная энергия равна отношению эффективной мощности источника тепла (дуги) q_n к скорости перемещения дуги v

$$\frac{q}{v} = \frac{IU\eta_{\text{н}}}{v} \text{ Дж/м.}$$

При образовании сварного шва эффективная тепловая мощность дуги расходуется на расплавление основного и присадочного металла.

Сжатая дуга. Особым видом сварочной дуги является сжатая дуга — дуга, столб которой сжат с помощью сопла плазменной горелки или потока газов (аргона, азота и др.). Плазма — это газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц, общий заряд которых равен нулю.

Плазма генерируется в канале сопла, обжимается и стабилизируется его водоохлаждаемыми стенками и холодным плазмообразующим газом. Обжатие и охлаждение наружной поверхности

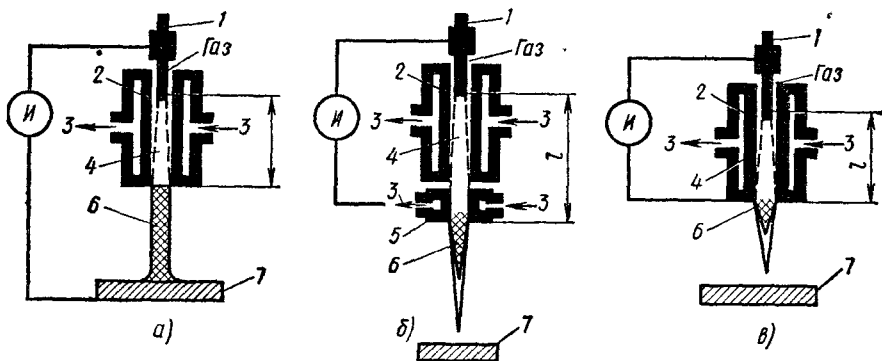


Рис. 8. Схемы сварки плазменной дугой (а) и плазменной струей (б, в):

1 — электрод, 2 — канал, 3 — охлаждающая вода, 4 — столб дуги, 5 — сопло, 6 — плазменная струя, 7 — изделие, И — источник тока, l — длина рабочей части канала

столба дуги вызывает его концентрацию, что приводит к резкому увеличению числа соударений между частицами плазмы, увеличению степени ионизации и резкому повышению температуры столба дуги (до 10 000—20 000 К) и кинетической энергии плазмы, которая используется для сварки и резки. Устройство для создания направленного потока плазмы, движущегося с большой скоростью и обладающего большим запасом энергии, называется плазмотроном или плазменной горелкой.

Имеется несколько схем устройств для получения плазменных дуг и струй:

для получения плазменной дуги, когда сопло и канал совмещены, плазменная струя совпадает со столбом дуги, одним из электродов является обрабатываемый материал (рис. 8, а);

для получения плазменной струи, выделенной из столба дуги при отдельных сопле и канале (рис. 8, б);

то же, но с совмещенными соплом и каналом (рис. 8, в).

Плазменная струя создается дуговым разрядом 4, возбуждаемым между электродом 1 и вторым электродом, в качестве которого может служить изделие 7, раздельное сопло 5 или стенки канала 2.

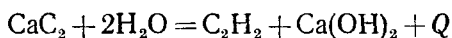
Эффективный к. п. д. плазменно-дугового нагрева ниже, чем к. п. д. дуги, что объясняется большой теплоотдачей стенкам сопла и окружающему пространству, и составляет $\eta_n = 0,3 \div 0,8$.

§ 5. Газовое пламя

При газопламенной обработке (сварке, резке, поверхностной обработке, пайке) в качестве источника тепла используется газовое пламя — пламя горючего газа, сжигаемого для этой цели в кислороде в специальных горелках.

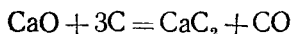
В качестве горючих газов используют ацетилен, водород, природные газы, нефтяной газ, пары бензина, керосина и др. Наиболее высокую температуру по сравнению с пламенем других газов имеет ацетилено-кислородное пламя, поэтому оно нашло наибольшее применение.

Ацетилен (C_2H_2) является химическим соединением углерода и водорода. Его получают в специальных аппаратах — газогенераторах при взаимодействии воды с карбидом кальция (CaC_2). Реакция разложения карбида кальция с образованием газообразного ацетилена и гашеной извести протекает со значительным выделением теплоты Q :



При разложении 1 кг карбида кальция образуется 0,25—0,3 м³ ацетилена.

Карбид кальция получают в электрических дуговых печах при температуре 1900—2300°C сплавлением кокса с негашеной известью по реакции



Ацетилено-кислородное пламя состоит из трех зон (рис. 9): ядра пламени 1, средней восстановительной зоны 2, факела пламени — окислительной зоны 3. Ядро представляет собой газовую смесь сильно нагретого кислорода и диссоциированного (разделенного) ацетилена — $2C + H_2 + O_2$, ядро выделяется резким очертанием и ярким свечением. Горение начинается на внешней оболочке ядра и продолжается во второй зоне. В зоне 2 происходит первая стадия сгорания ацетилена за счет кислорода, поступающего из баллона по реакции $2C + H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$. Углерод сгорает не полностью, а водород, как имеющий меньшее сродство к кислороду по сравнению с углеродом, в этой зоне не окисляется (не сгорает). Зона 2, имеющая самую высокую температуру и обладающая восстанови-

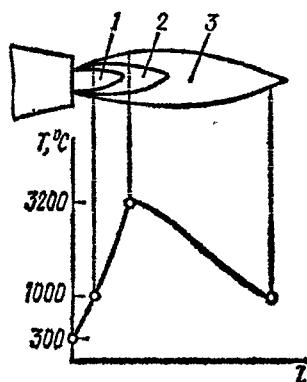
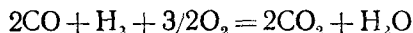


Рис. 9. Схема нормального ацетилено-кислородного пламени и распределения температур

тельными свойствами, называется сварочной или рабочей зоной. В зоне 3 (факеле) протекает вторая стадия горения ацетилена за счет атмосферного кислорода по реакции:



Углекислый газ и пары воды при высоких температурах окисляют железо, поэтому эту зону называют окислительной.

Для полного сгорания одного объема ацетилена требуется два с половиной объема кислорода: один объем поступает из кислородного баллона и полтора объема — из воздуха. Количество тепла в джоулях, получаемое при полном сгорании 1 м³ газа, называется теплотворной способностью.

Газовое пламя нагревает металла вследствие процессов теплообмена — вынужденной конвекции и излучения.

Тепловые характеристики газового пламени (температура, эффективная тепловая мощность, распределение теплового потока пламени по пятну нагрева) зависят от теплотворной способности горячего газа, чистоты кислорода и их соотношения в смеси.

Температура газового пламени (°С) неодинакова в различных его частях и достигает наибольшего значения на оси пламени вблизи конца ядра. Тепловую мощность газового пламени, получаемого в сварочных горелках, условно оценивают часовым расходом ацетилена (л/ч).

Эффективная мощность пламени q_n , т. е. количество тепла, вводимое в нагреваемый металл в единицу времени, возрастает с увеличением расхода газа.

Эффективный к. п. д. процесса нагрева металла η_n газовым пламенем, определяемый как отношение эффективной мощности q_n к полной мощности пламени q , равен

$$\eta_n = \frac{q_n}{KV_{\text{C}_2\text{H}_2}},$$

где $KV_{\text{C}_2\text{H}_2}$ — полная тепловая мощность ацетилено-кислородного пламени; K — коэффициент, $K \approx 0,84$; η_n зависит от мощности пламени и меняется в пределах от 0,8 (малая мощность) до 0,25 (большая мощность).

Газовое пламя является рассредоточенным источником тепла. Наибольший тепловой поток на оси ацетилено-кислородного пламени обычной сварочной горелки в 8—12 раз меньше, чем у открытой сварочной дуги примерно одинаковой эффективной мощности, поэтому газовое пламя нагревает металл медленнее и плавнее, чем сварочная дуга.

§ 6. Лучевые источники энергии

Лучевые источники энергии используют при сварке электронным лучом, лазерной сварке и световой сварке. При сварке электронным лучом носителем энергии являются электроны, при лазерной и световой — фотоны.

Характерным признаком для лучевых источников является высокая плотность энергии в пятне нагрева, которая достигается концентрацией потока энергии с помощью специальных фокусирующих устройств.

Площадь нагрева электронным лучом может быть по сравнению с газовым пламенем и дугой в 1000 раз меньше (см. табл. 1), при плотности энергии в 1000 раз большей. При использовании фотонного луча эта разница еще значительнее. Высокая плотность энергии в малом пятне нагрева определяет основные преимущества при сварке электронным лучом и лазером — выгодную форму проплавления (ножевая, кинжальная) и возможность получения прецизионных соединений. Вместе с тем при сварке глубоко внедренным лучом возникают дополнительные трудности: большая опасность пор и горячих трещин, колебания глубины проплавления и подрезы.

Электронный луч. Электронный луч — поток электронов, выпускаемых одним источником и движущихся по близким траекториям в определенном направлении. Сущность процесса сварки электронным лучом в вакууме состоит в использовании кинетической энергии электронов. При бомбардировке электронами поверхности металла подавляющая часть их кинетической энергии превращается в теплоту, которую и используют для расплавления металла.

Электронный луч создается в специальном приборе — электронной пушке (рис. 10), с помощью которой получают узкие электронные пучки с большой плотностью энергии. Пушка имеет катод 1, который может нагреваться до высоких температур. Катод размещен внутри прикатодного электрода 2. На некотором расстоянии от катода находится ускоряющий электрод (анод) 3 с отверстием. Электроны, выходящие с катода, фокусируются с помощью электрического поля между прикатодным и ускоряющим электродами в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде 3. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, выпускаемые катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и энергию. Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника 7 постоянного тока.

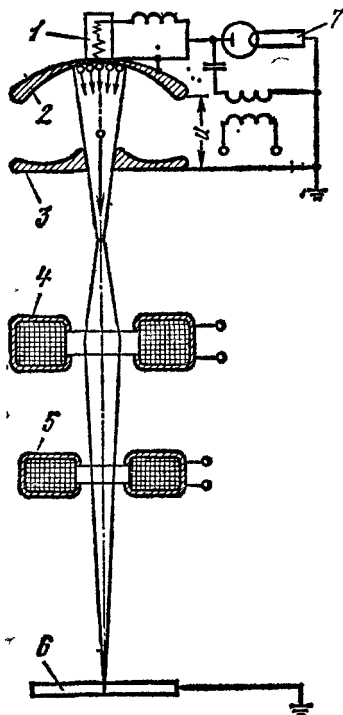


Рис. 10. Схема установки для сварки электронным лучом

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из первого анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 4. Сфокусированные в плотный пучок летящие электроны ударяются с большой скоростью о малую, резко ограниченную площадку (пятно нагрева) на изделии 6, при этом кинетическая энергия электронов, вследствие торможения превращается в теплоту, нагревая металл до очень высоких температур. Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 5, позволяющую устанавливать луч точно по линии стыка.

Для обеспечения свободного движения электронов от катода к аноду и далее к изделию, для тепловой и химической изоляции катода, а также для предотвращения возникновения дугового разряда между электродами в установке для сварки создается глубокий вакуум порядка $133 \cdot 10^{-4}$ Па, обеспечиваемый вакуумной насосной системой установки.

Мощность электронного луча может достигать очень больших величин, что делает его перспективным для сварки больших толщин (200—500 мм). Возможность высокой концентрации энергии при использовании малой мощности позволяет сваривать электронным лучом изделия микроэлектроники.

Основные параметры режима электронно-лучевой сварки — сила тока, напряжение электронного луча, скорость сварки. Ускоряющее напряжение и сила тока луча определяют мощность источника энергии.

При импульсном режиме электронно-лучевой сварки тепловыделение дополнительно регулируют частотой и длительностью сварочных импульсов. Эффективный к. п. д. η_n электронно-лучевого нагрева изменяется в пределах 0,7—0,9.

Лазерный луч. При лазерной сварке для местного расплавления соединяемых частей используют энергию светового луча полученного от оптического квантового генератора-лазера. По виду активного вещества-излучателя лазеры разделяют на твердые, газовые, жидкостные и полупроводниковые, по принципу генерации лазерного луча — импульсные и непрерывные.

Сущность получения лазерного луча заключается в следующем. За счет накачки внешней энергии (электрической, световой, тепловой, химической) атомы активного вещества излучателя переходят в возбужденное состояние. Через некоторый промежуток времени возбужденный атом может излучить полученную энергию в виде фотона и возвратиться в исходное состояние. Фотон представляет собой элементарную частицу, порцию света, обладающую нулевой массой покоя и движущуюся со скоростью, равной скорости света в вакууме. Фотоны возникают (излучаются) в процессах перехода атомов, молекул, ионов и атомных ядер из возбужденных состояний в более стабильные состояния с меньшей энергией. При определенной степени возбуждения происходит лавинообразный переход возбужденных атомов активного вещества-излучателя в более стабильное состояние. Это создает когерентное, связанное с возбужде-

нием, световое монохроматическое * излучение, которое усиливается в излучателе многократным отражением от его стенок и выпускается в виде узкого направленного пучка. Таким образом, создается лазерный луч — монохроматический направленный поток фотонов. В настоящее время для сварки используют твердотельные и газовые лазеры. В современных твердотельных лазерах в качестве активного элемента используют оптическое стекло с примесью неодима и других редкоземельных элементов. Это позволяет повысить выходную мощность излучения. Твердотельные лазеры работают в импульсном режиме. Схема общей компоновки твердотельной лазерной сварочной установки приведена на рис. 11.

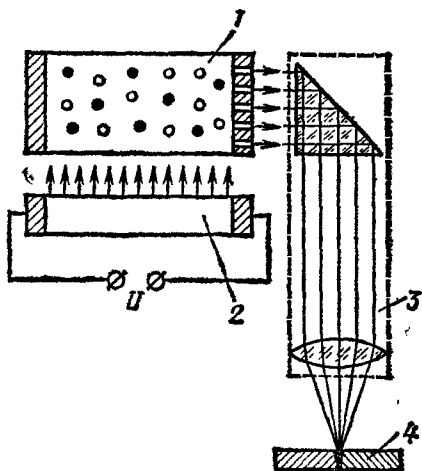


Рис. 11. Общая компоновка лазерной установки

Установка состоит из рабочего тела 1, лампы накачки 2, обеспечивающей световую энергию для возбуждения атомов активного вещества-излучателя. Полученное излучение фокусируется и направляется с помощью оптической системы 3 на свариваемое изделие 4. Мощность твердотельных лазеров невелика — 0,015—2 кВт. Газовые лазеры обладают более высокой выходной мощностью, работают в непрерывном и импульсном режимах и по своим технологическим возможностям становятся конкурентно-способными с электронно-лучевой сваркой.

Преимуществами лазерного луча являются возможность передачи энергии на большие расстояния неконтактным способом, сварка через прозрачные оболочки, так как для световых лучей прозрачные среды не служат преградами, получение качественных соединений на металлах, особо чувствительных к длительному действию теплоты, сварка на воздухе, в защитной атмосфере, вакууме. Основным недостатком лазерного источника энергии низкие значения к. п. д. установок, высокая стоимость оборудования, недостаточная мощность серийного оборудования.

Световой луч. В установках для сварки и пайки световым лучом можно использовать такие источники излучения, как солнце, угольная дуга, дуговые газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для технологических целей наиболее перспективные и удобные излучатели — дуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления. Дуговая ксеноновая лампа представляет собой шаровой баллон из опти-

* Монохроматическое излучение — электромагнитное излучение одной определенной частоты.

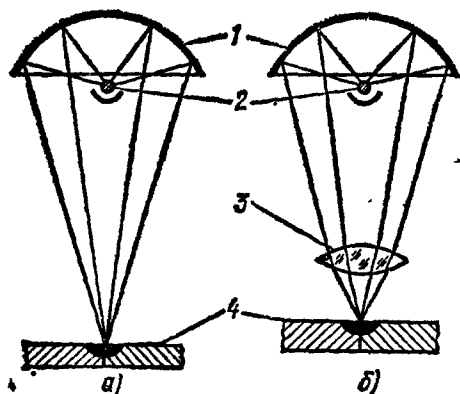


Рис. 12. Схемы оптических систем для сварки и пайки:

a — без линзовой оптики, *б* — с дополнительной линзовой оптикой; 1 — отражатель, 2 — источник света, 3 — оптическая линза, 4 — изделие

чески прозрачного кварца с помещенными в него двумя вольфрамовыми электродами. Давление ксенона в лампе в нерабочем состоянии достигает 1 МПа.

В системах, используемых для сварки световым лучом, концентрация энергии в пятне нагрева достигает 10^8 Вт/см² и может быть увеличена при применении специальных линз и отражателей. Принципиальная схема оптических систем для сварки и пайки приведена на рис. 12.

Область рационального применения процесса — приборостроение.

§ 7. Электрошлаковый процесс

Электрошлаковый процесс — это электротермический процесс, при котором преобразование электрической энергии в тепловую происходит при прохождении электрического тока через расплавленный электропроводный шлак. В отличие от дугового процесса под флюсом при электрошлаковом процессе почти вся электрическая мощность передается шлаковой ванне, а от нее — электроду и основному металлу. При этом расплавленный флюс служит защитой от вредного воздействия окружающей среды и средством металлургического воздействия на расплавленный металл. Количество тепла, выделяемого при электрошлаковом процессе, пропорционально току I , напряжению U , сопротивлению шлака R и времени t прохождения тока $Q = I \cdot U \cdot t$. Это тепло тратится на плавление металла, нагрев шлака и теплоотвод. Температура расплавленного шлака составляет около 2000°C , что обеспечивает плавление основного и электродного металла.

Электрошлаковый процесс как источник энергии для сварки характеризуется наибольшей площадью нагрева и наименьшей сосредоточенностью энергии в зоне нагрева.

Схема электрошлакового процесса приведена на рис. 13.

В пространстве, образованном кромками изделий 1 и формирующими приспособлениями 2, создается ванна расплавленного шлака 3, в которую погружается металлический электрод 4.

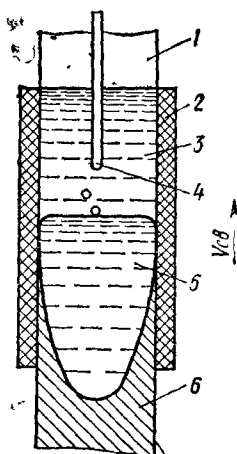


Рис. 13. Схема электрошлакового процесса

трод 4. Проходящий между электродом и основным металлом ток разогревает шлак. Электрод и кромки изделия расплавляются, образуя металлическую ванну 5, а затем закристаллизовавшийся металл 6. В качестве электродов используют электродные проволоки и пластины.

Контрольные вопросы

1. Назовите источники энергии при сварке.
2. Объясните строение сварочной дуги.
3. Какие свойства имеет сжатая дуга?
4. Объясните строение газового пламени.
5. За счет каких процессов происходит плавление металла при электроин-лучевой сварке?
6. Какие особенности имеют лазерный и световой источники нагрева?
7. В чем заключается сущность электрошлакового процесса?

Глава 3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

§ 8. Общие сведения

Образование сварного соединения в связи с введением концен-трированной энергии в зону соединения сопровождается сложными физическими и химическими процессами.

К физическим относят процессы, которые, изменяя физические свойства вещества, не изменяют строение элементарных частиц, из которых состоит данное вещество, и не приводят к изменению его химических свойств.

Химические процессы изменяют строение элементарных частиц, из которых состоит данное вещество, в результате чего получаются новые вещества с новыми химическими и физическими свойствами.

К основным физическим процессам при сварке плавлением относятся электрические, тепловые, механические процессы в источниках нагрева; плавление основного и электродного (присадочного) металла, их перемешивание, формирование и кристаллизация сварочной ванны; ввод и распространение тепла в свариваемом соединении, приводящее к изменению структуры металла в шве и зоне термического влияния и образованию собственных сварочных деформаций и напряжений.

К основным химическим процессам относятся химические реакции в газовой и жидкой фазах, на границах фаз (газовой с жидкой, газовой с твердой, жидкой с твердой) при взаимодействии компонентов покрытий, флюсов, защитных газов с жидким металлом с образованием окислов, шлаков, окислением поверхности и т. д.

Физические и химические процессы при сварке сопряжены между собой по времени и пространству, поэтому их можно объединить общим понятием — физико-химические процессы.

Под действием физико-химических процессов возникает характерное строение сварного соединения.

Сварное соединение при сварке плавлением (рис. 14, а) включает в себя сварной шов 1, т. е. участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации сварочной ванны, зону сплавления 2, где находятся частично оплавленные зерна металла на границе основного металла и шва, зону термического влияния 3, т. е. участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке плавлением или резке, основной металл 4, т. е. металл подвергающийся сварке соединяемых частей, не изменивший свойств при сварке.

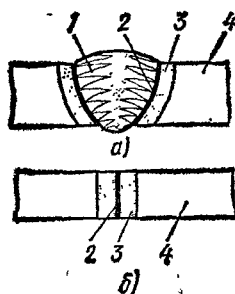


Рис. 14. Схема сварного соединения:

а — при сварке плавлением, б — при сварке давлением; 1 — сварной шов, 2 — зона сплавления (сцепления), 3 — зона влияния, 4 — основной металл

Соединение, выполненное сваркой давлением (рис. 14, б) в твердом состоянии, состоит из зоны соединения 2, где образовались межатомные связи соединяемых частей, зоны термомеханического влияния 3, основного металла 4.

В формировании структуры и свойств сварного соединения при сварке плавлением определяющая роль принадлежит тепловым процессам, при сварке давлением — пластической деформации.

§ 9. Плавление электродного и основного металла

Сварной шов образуется в результате кристаллизации металла сварочной ванны. При сварке без дополнительного металла расплавляется только основной металл. Металл, предназначенный для введения в сварочную ванну в дополнение к расплавленному основному металлу, называется присадочным металлом.

Расплавленные основной и присадочный металлы, сливаясь, образуют общую сварочную ванну. Границами сварочной ванны служат оплавленные участки основного металла и ранее образовавшегося шва.

Плавление и перенос электродного металла. Электродный металл при дуговой сварке плавится за счет тепла, выделяемого на конце электрода в приэлектродной области дуги, тепла, попадающего из столба дуги, нагрева вылета электрода при прохождении сварочного тока от токопровода и до дуги. Чем больше вылет электрода, тем больше его сопротивление, и тем больше выделяется тепла.

Конец электрода нагревается до температур 2300—2500°C, что и обеспечивает его плавление. На конце электрода образуются капли расплавленного металла, которые переносятся через дуговое пространство в сварочную ванну.

Капли формируются на конце электрода и переносятся под воздействием сил поверхностного натяжения, тяжести, давления газов, образующихся внутри расплавленного металла. давления газо-

вого потока, электростатических и электродинамических сил, реактивного давления паров металла.

В зависимости от соотношения сил, действующих на каплю, характер переноса электродного металла может быть различным:

крупнокапельным (характерен для ручной дуговой сварки покрытым электродом) или мелкокапельным (наблюдается при сварке под флюсом и в защитных газах — аргоне, углекислом газе и др., рис. 15, а);

струйным (имеет место при сварке в аргоне при токах, больших некоторых критических значений, рис. 15, в);

за счет коротких замыканий (характерен для сварки в углекислом газе, рис. 15, б).

Главными силами, формирующими и удерживающими каплю на конце электрода, являются силы поверхностного натяжения, возникающие на поверхности капли и направленные внутрь ее.

Отрыв капли и ее перенос обеспечивается электродинамическими силами и давлением газовых потоков. Эти силы увеличиваются с ростом сварочного тока, увеличение тока приводит к измельчению капель. Сила тяжести капли имеет существенное значение при малых плотностях тока и способствует отрыву и переносу капель металла только при сварке в нижнем положении.

Перенос электродного металла в дуге сопровождается выбросом части металла за пределы сварочной ванны — разбрызгиванием. Разбрызгивание связано главным образом с электрическим взрывом перемычки между отделяющейся каплей и торцом электрода под действием электромагнитных сил.

Плавление основного металла. Основной металл плавится в результате выделения тепла в активном пятне (в приэлектродной области) на поверхности изделия и тепла столба дуги.

Форма проплавления (глубина и ширина) определяется концентрацией теплового и силового воздействия дуги.

Основные компоненты силового воздействия дуги;

поверхностные силы — давление, вызываемое торможением струи плазмы дуги о поверхность металла, реактивное давление струи пара с поверхности сварочной ванны;

объемная электродинамическая сила в жидком металле.

Давление осевого плазменного потока вызывается электромагнитными силами, его величина пропорциональна квадрату тока.

Дуга с плавящимся электродом оказывает большее силовое воздействие на сварочную ванну, чем дуга с неплавящимся электродом.

Сила давления от газового потока невелика и составляет около 1% силы давления потока, вызываемого электромагнитными силами.

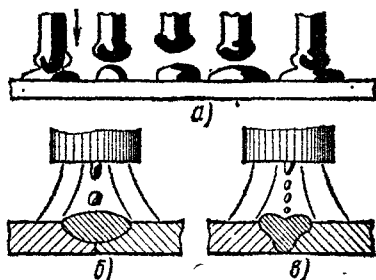


Рис. 15. Схемы расплавления и переноса электродного металла: а — короткими замыканиями, б — капельный, в — струйный

Процесс проплавления металла определяется тепловым и силовым воздействием дуги.

Производительность процессов плавления. В наибольшей степени тепловую мощность дуги, производительность процесса плавления и глубину проплавления определяет величина сварочного тока. С увеличением силы тока дуги возрастает длина сварочной ванны, ее ширина и глубина проплавления H , которая приближенно может быть оценена зависимостью, близкой к линейной: $H = KI_d$.

С увеличением напряжения также возрастает тепловая мощность дуги, а следовательно, и размеры сварочной ванны. Особенно интенсивно возрастают ширина B и длина ванны L :

$$B = K \frac{I_d U_d}{v_{св} S}, \quad L = K \frac{(I_d U_d)^2}{v_{св} S^2},$$

где $v_{св}$ — скорость сварки, S — толщина свариваемого металла, K — коэффициент, зависящий от рода тока, полярности, диаметра электрода, степени сжатия дуги и др.

Производительность сварки плавящимся электродом определяется коэффициентами расплавления и наплавки. Расплавление посадочного металла характеризуется коэффициентом расплавления

$$\alpha_p = \frac{G_p}{It},$$

где α_p — коэффициент расплавления, г/(А·ч); G_p — масса расплавленного за время t электродного металла, г; t — время горения дуги, ч; I — сварочный ток, А.

Количество наплавленного металла или скорость наплавки определяется коэффициентом наплавки

$$\alpha_n = \frac{G_n}{It},$$

где α_n — коэффициент наплавки, г/(А·ч); G_n — масса наплавленного за время t металла, г (с учетом потерь).

Разница в коэффициентах α_p и α_n определяется потерями электродного металла на угар, разбрызгивание, испарение и т. п. Коэффициент этих потерь ψ_n определяется по формуле

$$\psi_n = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \cdot 100\%.$$

Коэффициенты α_p , α_n , ψ_n зависят от вида, способа и параметров режима сварки. При малых плотностях тока (ручная дуговая сварка) значение коэффициентов расплавления и наплавки не превышает $7 \div 10$ г/(А·ч). С увеличением плотности тока значение коэффициентов возрастает до 17 г/(А·ч) и более. Коэффициент потерь различных способов сварки составляет $1-15\%$.

§ 10. Формирование и кристаллизация сварочной ванны

Формирование сварочной ванны происходит под действием силы тяжести расплавленного металла P_m , давления источника теплоты P_d (например, давления дуги) P_d и сил поверхностного натяжения P_n , действующих на поверхности металла (рис. 16). Характер действия этих сил зависит от положения сварки.

При сварке в нижнем положении при сквозном проплавлении жидкая ванна удерживается на весу силами поверхностного натя-

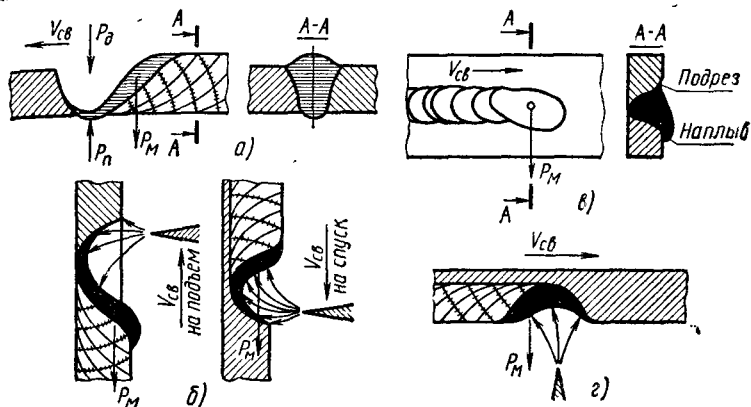


Рис. 16. Схема сил, действующих в сварочной ванне, и формирование шва в разных пространственных положениях:

а — нижнее положение, б — вертикальное, в — горизонтальное, г — потолочное; $V_{св}$ — направление сварки

жения P_n , которые уравновешивают давление, оказываемое на ванну источником теплоты P_d , и силу тяжести (вес) жидкого металла P_m : $P_d + P_m = P_n$.

В том случае, если сила тяжести расплавленного металла и сила давления источника теплоты превысят силы поверхностного натяжения, т. е. $P_d + P_m > P_n$, произойдет разрыв поверхностного слоя в проплаве, и жидкий металл вытечет из ванны, образуя прижог.

В условиях движущейся сварочной ванны (во время сварки) возникают дополнительные гидродинамические силы, вызванные перемещением расплавленного металла в хвостовую часть ванны.

В случаях, когда силы поверхностного натяжения не могут уравновесить разрушающие силы, необходимо применять специальные меры — ограничивать объем сварочной ванны, применять сварку на подкладках, использовать удерживающие приспособления. Удержание ванны от стекания имеет особенно важное значение при сварке в вертикальном и потолочном положениях. При сварке в вертикальном положении процесс можно вести сверху вниз (на спуск) или снизу вверх (на подъем). В обоих случаях сила тяжести ванны направлена вниз по продольной оси шва. При сварке на спуск удержание ванны от стекания способствует давление дуги и силы поверхностного натяжения. При сварке на подъем ванна удерживается

только силами поверхностного натяжения. При сварке в вертикальном положении для удержания ванны необходимо ограничивать тепловую мощность и размеры ванны.

Выполнение швов в потолочном положении осложняется не только опасностью стекания ванны. Возникает необходимость переноса присадочного металла в ванну в направлении, противоположном действию силы тяжести. При сварке в потолочном положении ванна удерживается силами поверхностного натяжения и давлением дуги. Для удержания ванны в потолочном положении также необходимо ограничивать ее объем.

Очень неблагоприятные условия формирования шва при выполнении горизонтальных швов на вертикальной плоскости. Расплавленный металл ванны натекает на нижнюю свариваемую кромку, что приводит к формированию несимметричного усиления шва, а также подрезов. При сварке горизонтальных швов предъявляются жесткие требования к сокращению размеров сварочной ванны.

Кристаллизация металла сварочной ванны. При сварке плавлением сварочную ванну можно условно разделить на два участка: головной, где происходит плавление основного и дополнительного металлов, и хвостовой, где происходит затвердевание расплавленного металла. Переход металла сварочной ванны из жидкого состояния в твердое называют кристаллизацией. Отличительные особенности кристаллизации сварочной ванны:

1. Источник тепла при сварке перемещается вдоль соединяемых кромок, а вместе с ним движется плавильное пространство и сварочная ванна. При дуговой сварке столб дуги, расположенный в головной части ванны, оказывает механическое воздействие — давление на поверхность расплавленного металла за счет удара заряженных частиц, давления газов и дутья дуги. Давление приводит к вытеснению жидкого металла из-под основания дуги и погружению столба дуги в толщу основного металла. Жидкий металл, вытесненный из-под основания дуги, по мере передвижения дуги отбрасывается в хвостовую часть сварочной ванны. При удалении дуги отвод тепла начинает преобладать над притоком и начинается затвердевание — кристаллизация сварочной ванны. В процессе затвердевания по границе расплавления образуются общие кристаллиты, что и обеспечивает монолитность соединения.

2. Малый объем сварочной ванны, который зависит от вида и режима сварки и изменяется от 0,1 до 10 см³, поэтому теплоотвод в прилегающий холодный металл очень велик, велика и скорость кристаллизации.

3. Значительный перегрев расплавленного металла и его интенсивное перемешивание.

4. Кристаллизация сварочной ванны при сварке плавлением начинается в основном от готовых центров кристаллизации — частично оплавленных зерен основного металла. Металл шва, выполненного сваркой плавлением, имеет столбчатое строение, так как состоит из вытянутых (столбчатых) кристаллитов, растущих при кристаллизации в направлении, обратном теплоотводу.

§ 11. Металлургические процессы при сварке

Химический состав металла шва. Химический состав металла шва и его свойства зависят от состава и доли участия в формировании шва основного и электродного (присадочного) металла, реакций взаимодействия расплавляемого металла с газами атмосферы и защитными средствами.

Металл шва в общем случае при сварке плавящимся электродом или применении металлических присадок (проволоки, порошка и т. п.) образуется в результате перемешивания в ванне основного и электродного (присадочного) металла. Доля основного металла (ψ_0) в шве зависит от вида соединения (с разделкой, без разделки), вида и режима сварки и может быть определена по отношению площади, занятой основным металлом в поперечном сечении шва, ко всей его площади (рис. 17)

$$\psi_0 = \frac{F_{np}}{F_{np} + F_n},$$

где F_{np} , F_n — площади, занятые основным и электродным (присадочным) металлом соответственно.

При ручной дуговой сварке покрытым электродом доля основного металла в шве составляет 0,15—0,40 — при наплавке валиков, 0,25—0,50 — при сварке корневых швов, 0,25—0,60 — при сварке под флюсом.

При отсутствии химических реакций в зоне сварки содержание любого элемента в металле шва ($C_{ш}$) может быть найдено по формуле $C_{ш} = C_0\psi_0 + C_a(1-\psi_0)$, где C_0 , C_a — исходное содержание элемента в основном и электродном металле, ψ_0 — доля основного металла, например, определим содержание никеля в металле шва при дуговой сварке стали, содержащей 1,2% никеля, с использованием электродной проволоки с содержанием никеля 1,5% (сварка встык без разделки). Принимая среднее значение $\psi_0 = 0,3$, получаем $C_{ш} (Ni\%) = = 1,2 \cdot 0,3 + 1,5 (1 - 0,3) = 1,41\%$.

В случае химических реакций расплавленного металла с газами, покрытиями, шлаковой ванной состав металла шва определяют с учетом коэффициентов перехода, показывающих, какая доля металла, содержащегося в электродной проволоке, переходит в металл шва $C_{ш} = C_0\psi_0 + \eta C_a(1-\psi_0)$, где η — коэффициент перехода, он изменяется в широких пределах (0,3—0,95) в зависимости от химической активности элемента, вида сварки, технологии сварки и др.

Металлургические реакции при сварке. При сварке без защиты расплавляемый металл интенсивно поглощает газы атмосферы, по-

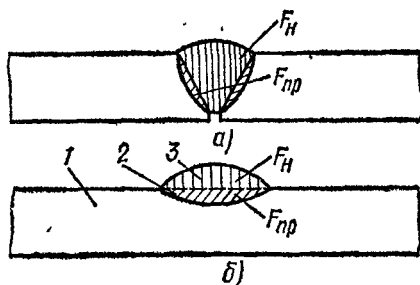


Рис. 17. Поперечное сечение шва:

a — стыковое соединение, *б* — наплавка;
1 — основной металл, 2 — проплавленный металл, 3 — наплавленный металл

этому сварные швы обладают низкими механическими свойствами. Для изоляции металла от воздуха в процессе сварки применяют различные средства защиты: электродные покрытия, флюсы, защитные газы, вакуум. Однако полностью изолировать металл от воздуха обычно не удается. Сами средства защиты также взаимодействуют с металлом, даже инертный газ и вакуум, содержащие некоторое количество примесей. Химические реакции взаимодействия расплавленного металла с газами и средствами защиты называются сварочными металлургическими реакциями.

Выделяют две основные зоны или стадии взаимодействия расплавленного металла с газами и шлаком: торец электрода с образующимися на нем каплями и сварочную ванну. Полнота протекания металлургических реакций зависит от температуры, времени взаимодействия, поверхности и концентрации реагирующих веществ.

Характерные условия металлургических реакций при сварке, как и при кристаллизации, — высокая температура нагрева, относительно малый объем расплавляемого металла, кратковременность процесса.

Средняя температура капель электродного металла, поступающих в ванну, увеличивается с увеличением плотности тока и составляет при сварке сталей от 2200 до 2700° С, т. е. характеризуется значительным перегревом. Температура сварочной ванны при дуговой сварке также характеризуется значительным превышением над точкой плавления, перегрев составляет 100—500° С. Высокая температура способствует высокой скорости протекания реакций, однако из-за больших скоростей охлаждения реакции при сварке обычно не успевают завершиться полностью.

Металлургические реакции при сварке одновременно протекают в газовой, шлаковой и металлической фазах.

Взаимодействие металла с газами. При дуговой сварке газовая фаза зоны дуги, контактирующая с расплавленным металлом, состоит из смеси N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 , CO , паров H_2O , а также продуктов их диссоциации и паров металла и шлака. Азот попадает в зону сварки главным образом из воздуха. Источниками кислорода и водорода являются воздух, сварочные материалы (электродные покрытия, флюсы, защитные газы и т. п.), а также окислы, поверхностная влага и другие загрязнения на поверхности основного и присадочного металла. Наконец, кислород, водород и азот могут содержаться в избыточном количестве в переплавляемом металле. В зоне высоких температур происходит распад молекул газа на атомы (диссоциация). Молекулярный кислород, азот и водород распадаются и переходят в атомарное состояние $O_2 \rightleftharpoons 2O$, $N_2 \rightleftharpoons 2N$, $H_2 \rightleftharpoons 2H$. Активность газов в атомарном состоянии резко повышается.

При контакте расплавленного металла, содержащегося в газовой или шлаковой фазах, происходит растворение кислорода в металле, а при достижении предела растворимости — химическое взаимодействие с образованием окислов. Одновременно происходит окисление примесей и легирующих элементов, содержащихся

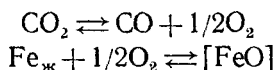
в металле. В первую очередь окисляются элементы, обладающие большим сродством к кислороду. Например, титан окисляется по реакции $Ti + O_2 = TiO_2$, марганец по реакции $Mn + O_2 = MnO_2$.

Железо образует с кислородом три соединения (окисла): закись железа FeO , содержащую 22,27% O_2 ; закись-окись железа Fe_3O_4 , содержащую 27,64% O_2 ; окись железа, содержащую 30,06% O_2 . Кислород снижает прочностные и пластические свойства металла.

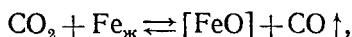
Азот растворяется в большинстве конструкционных материалов и со многими элементами образует соединения, которые называются нитридами. С железом он образует нитриды Fe_2N (11,15% N_2) и Fe_4N (5,9% N_2). Азот вызывает охрупчивание, поры и старение сталей.

Водород также растворяется в большинстве металлов. Металлы, способные растворять водород, можно разделить на две группы. К первой группе относятся металлы, не имеющие химических соединений с водородом (железо, никель, кобальт, медь и др.). Ко второй группе относятся металлы (титан, цирконий, ванадий, ниобий, тантал, палладий, редкоземельные элементы и др.), образующие с водородом химические соединения, которые называются гидридами. Водород очень вредная примесь, так как является причиной пор, микро- и макротрещин в шве и в зоне термического влияния.

Углекислый газ, присутствующий в зоне дуги при сварке в CO_2 , активно окисляет металл по реакции, которая протекает в две стадии:



В суммарном виде реакция имеет вид



где $[FeO]$ — закись железа, растворившаяся в железе.

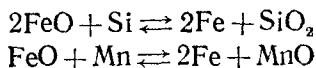
Образующаяся окись углерода CO в металле шва не растворяется, в процессе кристаллизации сварочной ванны она выделяется и может образовать поры. Углекислый газ применяют для защиты зоны сварки при использовании раскисляющих элементов (Mn , Si), нейтрализующих окислительное действие CO_2 .

Водяной пар, находящийся в газовой фазе, взаимодействует с жидким металлом по уравнению $H_2O + Fe_{ж} \rightleftharpoons [FeO] + H_2$.

Основные способы борьбы с вредным влиянием газов — качественная защита и применение элементов раскислителей в сварочных материалах.

Взаимодействие металла со шлаком. При расплавлении сварочного флюса, электродного покрытия, сердечника порошковой проволоки образуется шлак. Основное назначение сварочного шлака — изоляция расплавленного металла от воздуха. Флюсы и покрытия стабилизируют дугу, способствуют качественному формированию шва, осуществляют металлургическую обработку расплавленного металла — его раскисление и легирование.

Характерными реакциями раскисления являются реакции раскисления закиси железа кремнием и марганцем, содержащимися в сварочных флюсах и покрытиях:



Оксиды кремния и марганца переходят в шлак.

Сварочные материалы наряду с окислителями могут содержать вредные компоненты — серу и фосфор, так как они являются причиной горячих трещин и охрупчивания металла шва. Сера, соединяясь с железом, образует сульфид железа FeS . Металл очищают от серы, вводя более активный элемент, чем свариваемый металл, по реакции $\text{FeS} + \text{Mn} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{MnS}$. Сульфид марганца менее растворим в стали, чем сульфид железа, что вызывает перераспределение серы из расплавленного металла в шлак.

§ 12. Термический цикл сварки и структура сварного соединения

Металл в любой зоне сварного соединения испытывает нагрев и последующее охлаждение. Изменение температуры металла во время сварки называется термическим циклом сварки. Максимальная температура нагрева в разных зонах соединений различна: в шве

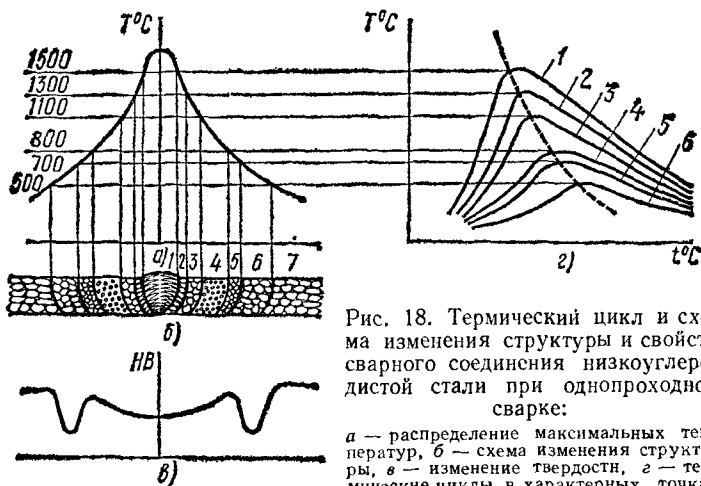


Рис. 18. Термический цикл и схема изменения структуры и свойств сварного соединения низкоуглеродистой стали при однопроходной сварке:

а — распределение максимальных температур, б — схема изменения структуры, в — изменение твердости, г — термические циклы в характерных точках соединения

максимальная температура превышает, в зоне сплавления — близка, в зоне термического влияния — меньше температуры плавления, постепенно уменьшаясь по мере удаления от шва.

При нагреве в металле происходят следующие структурные и фазовые превращения:

растворение фаз в металле в твердом состоянии, например, карбидов (соединений металла с углеродом) в нагретом металле;

полиморфное превращение, т. е. превращение низкотемпературной модификации материала в высокотемпературную;
плавление металла в участках, нагреваемых выше температуры плавления.

При охлаждении структурные и фазовые превращения идут в обратном порядке;

кристаллизация;

полиморфное превращение т. е., переход из высокотемпературной фазы в низкотемпературную;

выпадение из металла различных вторичных фаз: карбидов, интерметаллидов и др.

Кроме названных превращений в металле в низкотемпературной области при сварке происходят структурные изменения, вызывающие разупрочнение основного металла: рекристаллизация, старение и др.

Рассмотрим термический цикл и структуру сварного соединения при дуговой сварке низкоуглеродистой стали (рис. 18).

На рис. 18 показано, как распределяется максимальная температура в сварном соединении, схематичная структура разных зон соединения, изменение температуры (термические циклы) в этих зонах и свойства металла.

Каждый металл состоит из очень мелких зерен. Эти зерна можно видеть на изломе. Совокупность всех зерен металла называется его структурой. В металле различают макро- и микроструктуру. Макроструктура рассматривается невооруженным глазом и при небольших (до 10—15 раз) увеличениях. Структура металла, изучаемая при увеличениях более чем в 60—100 раз, называется микроструктурой.

На участке 1 металл, который находился в расплавленном состоянии, затвердевая, образует сварной шов, имеющий литую структуру из столбчатых кристаллов. Грубая столбчатая структура металла шва является неблагоприятной, так как снижает прочность и пластичность металла. Зона термического влияния имеет несколько структурных участков, отличающихся формой и строением зерна, вызванных различной температурой нагрева в пределах 1500—450° С.

Участок неполного расплавления 2 — переходный от наплавленного металла к основному. На этом участке происходит образование соединения и проходит граница сплавления, он представляет собой очень узкую область (0,1—0,4 мм) основного металла, нагретого до частичного оплавления зерен. Здесь наблюдается значительный рост зерен, скопление примесей, поэтому этот участок обычно является наиболее слабым местом сварного соединения с пониженной прочностью и пластичностью.

Участок перегрева 3 — область основного металла, нагреваемого до температур 1100—1450° С, в связи с чем металл отличается крупнозернистой структурой и пониженными механическими свойствами (пластичностью и ударной вязкостью). Эти свойства тем ниже, чем крупнее зерно и шире зона перегрева.

Участок нормализации 4 — область металла, нагреваемого до температур от 900 до 1100° С. Металл этого участка обладает высокими механическими свойствами, так как при нагреве и охлаждении на этом участке образуется мелкозернистая структура в результате перекристаллизации без перегрева.

Участок неполной перекристаллизации 5 — зона металла, нагреваемого при сварке до температур 725—900° С. В связи с неполной перекристаллизацией, вызванной недостаточным временем и температурой нагрева, структура этого участка характеризуется смесью мелких перекристаллизовавшихся зерен и крупных зерен, которые не успели перекристаллизоваться. Металл этого участка имеет более низкие механические свойства, чем металл предыдущего участка.

Участок рекристаллизации 6 — область металла, нагреваемого в пределах температур 450—725° С. Если сталь перед сваркой испытала холодную деформацию (прокатку, ковку, штамповку), то на этом участке развиваются процессы рекристаллизации, приводящие к росту зерна, огрублению структуры, и, как следствие, к разупрочнению.

Участок 7, нагреваемый в области температур 200—450° С, является зоной перехода от зоны термического влияния к основному металлу. В этой зоне могут протекать процессы старения в связи с выпадением карбидов железа и нитридов, в связи с чем механические свойства металла этой зоны понижаются.

Если металл перед сваркой был отожжен, то существенных изменений на участках 6 и 7 не происходит.

Ширина зоны термического влияния зависит от толщины металла, вида и режимов сварки. При ручной дуговой сварке она составляет обычно 5—6 мм, при сварке под флюсом средних толщин около 10 мм, при газовой сварке до 25 мм.

Контрольные вопросы

1. Какие физические и химические процессы происходят при образовании сварного соединения?
2. Как происходит плавление и перенос электродного металла в сварочную ванну?
3. Что называется кристаллизацией и какие особенности имеет кристаллизация сварочной ванны?
4. От чего зависит химический состав металла шва?
5. Как влияют газы атмосферы, загрязнения и примеси на свойства сварного соединения?
6. Что называется термическим циклом сварки?

Глава 4. ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ

§ 13. Понятие о деформациях и напряжениях

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил.

Напряжением называют силу, отнесенную к единице площади поперечного сечения тела. В зависимости от характера приложен-

ных сил различают напряжения растяжения, сжатия, изгиба, кручения и среза (рис. 19). При растяжении стержня приложенными к нему растягивающими усилиями одновременно происходит его удлинение и сужение поперечного сечения. Увеличение длины стержня Δl называется абсолютным удлинением $\Delta l = l_k - l_0$, где l_0 — первоначальная длина стержня, мм; l_k — длина стержня после приложения нагрузки, мм. Отношение абсолютного удлинения Δl к первоначальной длине стержня l_0 называется относительным удлинением

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Относительное удлинение, выраженное в процентах, записывается в виде

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%.$$

Аналогично предыдущему поперечное сужение ψ выражается уравнением

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

где F_0 — площадь поперечного сечения стержня до приложения усилия, мм²; F_k — площадь поперечного сечения стержня после приложения нагрузки, мм².

Величина напряжения σ находится от деления приложенной силы P на площадь сечения детали F , т. е.

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

где σ — напряжение, МПа, P — действующее усилие, Н, F — площадь поперечного сечения детали, м².

Деформации могут быть упругие и пластические. Если размеры и форма тела восстанавливаются после прекращения действия усилия, то такая деформация является упругой. Упругая деформация связана с изменением межатомных расстояний в теле при приложении нагрузки. Пластическая, или остаточная, деформация — деформация, остающаяся после снятия нагрузки. Пластическая деформация связана со сдвигом кристаллитов по отношению друг к другу.

Связь между напряжениями и деформациями в области упругого деформирования определяется выражением $\sigma = \epsilon E$, где σ — величина напряжения, МПа, $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ — относительная деформация, E — модуль упругости I рода, он характеризует жесткость материала

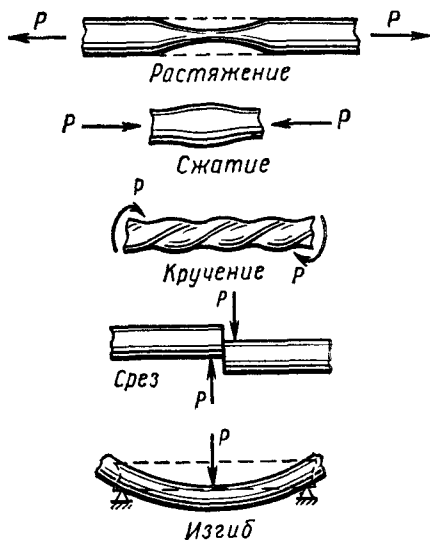


Рис. 19. Виды нагрузок и деформаций

лов при растяжении и является коэффициентом пропорциональности в зависимости напряжений от деформаций, E — измеряется в МПа, его величина для стали составляет $2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Упругая деформация по величине весьма незначительна. Для низкоуглеродистых сталей она не превышает 0,2%. Минимальное напряжение, при котором происходит такое удлинение образца без увеличения нагрузки, называется физическим пределом текучести

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0},$$

где P_T — усилие, при котором удлинение образца происходит без увеличения нагрузки, F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца.

§ 14. Деформации и напряжения при сварке

Классификация деформаций и напряжений. Помимо напряжений и деформаций, возникающих в деталях под действием приложенных нагрузок, в них могут быть так называемые собственные напряжения и деформации, которые существуют в телах даже при отсутствии каких-либо внешних сил.

В зависимости от продолжительности существования собственных напряжений и деформации при сварке разделяют на временные, т. е. существующие в период выполнения сварки или сопутствующих технологических операций, и остаточные, т. е. устойчиво сохраняющиеся в течение длительного времени после сварки.

Рис. 20. Некоторые виды сварочных деформаций:

a — деформация пластины: укорочение по длине l , ширине b , прогиб на длине h , ширине c ;
б, в — угловые деформации: углового (*б*) и стыкового (*в*) соединения

в пределах кристаллической решетки.

В зависимости от характера напряженного состояния собственные напряжения могут быть одноосными — линейными, двухосными — плоскостными и трехосными — объемными.

Различают деформации в плоскости (рис. 20, *a, б*), проявляющиеся в изменении формы и размеров детали или конструкции в плоскости, например, в виде продольных и поперечных деформаций; деформации вне плоскости, например в виде угловых деформаций, грибовидности, серповидности и т. д.

Деформации, которые изменяют размеры всего изделия, искажают его геометрические оси, называются общими. Деформации, относящиеся к отдельным элементам изделия в виде выпучин, хло-

дунов, волнистости и других местных искажений, называются местными.

Следует различать деформации непосредственно в зоне сварных соединений и деформации элементов конструкции в целом. Последние являются следствием деформаций и напряжений в сварном соединении.

Образование сварочных деформаций и напряжений. Основными причинами образования собственных напряжений и деформаций в сварных соединениях и конструкциях являются неравномерный нагрев и охлаждение металла при сварке, структурные и фазовые превращения, механическое (упругое и пластическое) деформирование при сборке, монтаже и правке сварных узлов и конструкций.

Представление о причинах возникновения тепловых сварочных деформаций и напряжений дает последовательное ознакомление с элементарным процессом нагрева и охлаждения стержня при разных условиях его заделки (закрепления).

Представим себе металлический стержень со свободной длиной l , жестко закрепленный с одной стороны (рис. 21, а). Если его нагреть, то такой стержень удлинится на некоторую величину $\Delta l_T = \alpha l T$, где α — температурный коэффициент расширения, l — длина стержня, T — температура нагрева. Если теперь охладить стержень до начальной температуры, то удлинение Δl_T исчезнет и стержень вновь будет иметь начальную длину l . Поскольку ничто не мешало удлинению и укорочению стержня, то в нем не возникнет никаких ни временных, ни остаточных напряжений.

Если точно на расстоянии l поставить жесткую преграду, препятствующую удлинению стержня, и вновь нагревать его, то при расширении (рис. 21, б) стержень будет давить на левую и правую преграды, со стороны которых возникают противодействующие силы реакции на давление стержня R , которые по отношению к стержню являются внешними сжимающими силами. В стержне возникнут напряжения σ сжатия, которые будут расти по мере роста температуры T в соответствии с выражением $\sigma = \alpha E T$, где произведение αT равно относительному удлинению, а E — модуль упругости. Если нагревать стержень до температур, вызывающих только упругое деформирование, то при его охлаждении до исходной температуры в нем не возникнет никаких напряжений и остаточных деформаций, его длина останется неизменной. Если же температура нагрева стержня превысит величину, при которой напряжения сжатия пре-

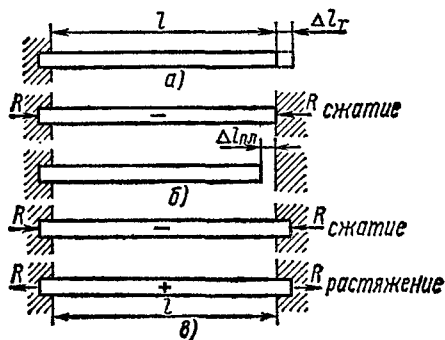


Рис. 21. Схема деформации стержня с различными условиями закрепления при нагреве

высят предел текучести материала, то в стержне помимо упругих появятся пластические деформации, т. е. он начнет пластически сжиматься (подсаживаться). Если после такого обжатия охладить стержень до начальной температуры, то его длина окажется короче по сравнению с исходной на величину пластического обжатия $\Delta l_{\text{пл}}$.

При нагреве стального стержня выше 100°C в нем возможно появление пластических деформаций.

Рассмотрим, наконец, случай, когда стержень закреплен жестко с обоих концов (рис. 21, в), закрепление препятствует как его удлинению, так и укорочению.

После нагрева до температур, не вызывающих пластического деформирования ($<100^\circ\text{C}$ для стали), и последующего охлаждения в стержне не останется никаких напряжений, так как при нагреве стержень деформировался

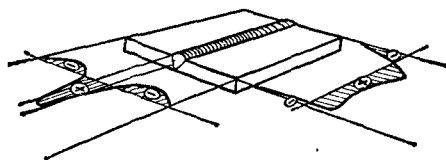


Рис. 22. Распределение остаточных сварочных напряжений в стыковом соединении

только упруго. На стадии нагрева в нем возникали сжимающие напряжения.

Нагрев до температур, превышающих температуру достижения σ_r ($>100^\circ\text{C}$), приводит к пластическому обжатию стержня и возникновению напряжений сжатия σ_r . При остывании стержень будет стремиться укоротиться на величину обжатия $\Delta l_{\text{пл}}$. Однако жесткое закрепление будет препятствовать сокращению. Реакция закрепления R вызовет появление в стержне растягивающих напряжений. Эти остаточные напряжения растяжения не появились бы, если бы стержень при нагреве не претерпел пластического обжатия.

Нагрев стержня из низкоуглеродистой стали при жестком его закреплении до температур $>200^\circ\text{C}$ приводит к появлению в нем после остывания растягивающих напряжений, равных пределу текучести и даже к пластическим деформациям растяжения.

Процессами, происходящими при нагреве и охлаждении заземленного стержня, объясняется образование временных и остаточных напряжений и деформаций, действующих в сварном шве и прилегающей зоне, где металл подвергается упругопластическому деформированию при нагреве и охлаждении в процессе сварки. Зона нагрева при сварке ведет себя как заземленный нагреваемый стержень, а холодные участки металла как заземление.

Обязательным условием возникновения остаточных деформаций и напряжений является наличие пластической деформации при нагреве. Чем выше нагрев и больше его неравномерность, тем более вероятно появление при нагреве пластических деформаций, а следовательно, и остаточных напряжений и деформаций.

Величина остаточных напряжений для углеродистых сталей достигает предела текучести, для сталей высоколегированных может превышать условный предел текучести, для титана, алюминия, меди, и тугоплавких металлов, как правило, меньше предела текучести.

Характерное распределение остаточных сварочных напряжений при сварке встык пластины показано на рис. 22.

При сварке закаливающихся сталей наряду с тепловыми деформациями и напряжениями возникают структурные напряжения в связи с образованием закалочной, мартенситной структуры, так как образование мартенсита сопровождается увеличением объема по сравнению с объемом феррита и перлита.

§ 15. Способы уменьшения сварочных деформаций и напряжений

Сварочные деформации вследствие изменения размеров и формы конструкций существенно затрудняют их сборку, ухудшают внешний вид и эксплуатационные качества. Сварочные напряжения снижают сопротивляемость сварных конструкций разрушению, особенно при воздействии циклических нагрузок и агрессивных сред. Поэтому применяют различные способы уменьшения или устранения сварочных деформаций и напряжений.

Мероприятия по уменьшению деформаций и напряжений могут осуществляться на разных стадиях изготовления конструкции: до сварки — на стадии проектирования конструкции и технологии производства, во время и после сварки.

Мероприятия, применяемые преимущественно для снятия сварочных напряжений, влияют на деформации и, наоборот, мероприятия, применяемые преимущественно для уменьшения деформаций, влияют на величину напряжений. Рассмотрим основные способы уменьшения сварочных деформаций и напряжений.

Уменьшение остаточных сварочных напряжений. Способы уменьшения остаточных напряжений делят на термические, механические и термомеханические. Наиболее эффективно снятие остаточных напряжений способами, осуществляемыми после сварки.

К термическим способам относят предварительный и сопутствующий подогрев во время сварки и высокий отпуск после сварки.

Подогрев снижает предел текучести металла в момент сварки, что и влияет на формирование и величину остаточных напряжений. Снижение напряжений при низкотемпературном подогреве (до 200—250°С) составляет ориентировочно не более 30—40%.

Общий высокий отпуск является наиболее эффективным методом уменьшения остаточных напряжений, так как позволяет снизить напряжения на 85—90% от исходных значений и одновременно улучшить пластические свойства сварных соединений. Высокий отпуск состоит из нагрева (для стали до температуры около 650°С), выдержки (2—4 ч) и медленного охлаждения.

Местный отпуск применяют для снятия пиковых величин остаточных напряжений и восстановления пластических свойств сварных соединений. При местном отпуске нагревают до заданной температуры лишь часть конструкции.

Поэлементный отпуск состоит в том, что при монтаже крупногабаритных конструкций подвергают отпуску отдельные узлы конструкции, включающие зоны и элементы, где отпуск необходим, а затем эти узлы сваривают между собой чаще всего встык с полным проваром без концентраторов. Обычно в этих соединениях предусматривают снятие напряжений местными способами (термическими или механическими).

Механические способы (проковка, прокатка, вибрация, взрывная обработка, ультразвуковая обработка, приложение нагрузки к сварным соединениям) основаны на создании пластической деформации металла сварных соединений, вследствие чего происходит снижение растягивающих остаточных напряжений.

Металл проковывают непосредственно после сварки по горячему металлу или после его остывания. Основное преимущество этого метода заключается в простоте применяемого оборудования, универсальности и оперативности.

Прокатка обеспечивает более равномерную пластическую деформацию металла по сравнению с проковкой и в основном предназначена для устранения остаточных деформаций.

Приложение нагрузки к сварным соединениям осуществляют растяжением или изгибом элементов. Суммирование остаточных и приложенных напряжений вызывает пластические деформации удлинения и после снятия нагрузки снижение максимальных напряжений.

Наряду с рассмотренными механическими методами для снятия напряжений начинают использовать вибрацию, ультразвуковую и взрывную обработку.

Термомеханические способы основаны на одновременном протекании тепловых и механических процессов.

Способы уменьшения сварочных деформаций. Все мероприятия по уменьшению деформаций можно разделить на три группы в зависимости от того, применяют ли их до сварки, в процессе сварки или после нее.

Мероприятия, применяемые до сварки.

1. Рациональное конструирование сварного изделия, которое включает:

уменьшение количества наплавленного металла и соответственно количества вводимого при сварке тепла за счет уменьшения сварных швов и их сечений;

избежание скоплений и перекрещиваний швов;

симметричное расположение швов для уравнивания деформаций;

симметричное расположение ребер жесткости, накладок, косынок и т. д. и их минимальное использование.

2. На стадии разработки технологии целесообразно предусматривать:

размеры и форму заготовок с учетом величины возникающих при сварке усадок;

предварительную деформацию заготовок, которая была бы противоположной ожидаемой сварочной деформации;

правильный выбор вида сварки, учитывая, что деформации при ручной сварке, как правило, больше, чем при автоматической, а деформации при сварке под флюсом больше, чем при сварке в углекислом газе.

М е р о п р и я т и я , п р и м е н я е м ы е в п р о ц е с с е с в а р к и :

снижение погонной энергии при назначении более экономичных режимов;

искусственное охлаждение зоны сварки, например, водой, водоохлаждаемыми медными накладками и т. д. для уменьшения зоны нагрева и соответственно сварочных деформаций;

закрепление свариваемых изделий в жестких приспособлениях; применение многослойных швов вместо однослойного, проковка швов после каждого прохода;

рациональная последовательность сварки для уравнивания деформаций, применение обратноступенчатого способа сварки, заключающегося в том, что всю длину шва разбирают на отдельные ступени и сварку каждой ступени выполняют в направлении, обратном общему направлению сварки.

М е р о п р и я т и я , п р и м е н я е м ы е п о с л е с в а р к и :

механическая правка сварных изделий для создания пластических деформаций, обратных сварочным, путем растяжения, изгиба, местного деформирования проковкой, прокаткой роликами, осадкой металла по толщине под прессом и др.;

тепловая правка местным нагревом. Расширяющийся при местном нагреве металл осаживается прилегающим холодным металлом, поэтому после охлаждения размеры нагретого участка уменьшаются, что приводит к устранению местных деформаций (хлопунов, выпучин и т. д.);

высокий отпуск деталей в зажимных приспособлениях.

§ 16. Прочность сварных соединений и конструкций

Под прочностью понимается свойство материалов в определенных условиях, не разрушаясь, воспринимать те или иные воздействия.

Расчеты на прочность включают в себя несколько этапов:

1. Определение напряженного состояния в конструкции, т. е. определение величины и вида напряжений в элементах конструкций. Эти напряжения состоят из **р а б о ч и х** напряжений, возникающих от внешнего нагружения (вес груза, давление и др.) или связанных с условиями эксплуатации (например, температурные напряжения); **с о б с т в е н н ы х** напряжений, возникающих при сборке, сварке и т. д.

2. Оценка возможного предельного состояния конструкции для данных условий эксплуатации. **П р е д е л ь н ы м** называется состояние, когда под действием нагрузки происходят качественные из-

менения свойств материала или наступает физический процесс, по каким-либо причинам недопустимый, нежелательный или опасный. Характерными случаями предельных состояний являются:

наступление текучести в основном сечении элементов конструкции или разрушение под действием статических, повторно-переменных и динамических нагрузок;

предельное состояние, обусловленное наибольшей деформацией конструкции, недопустимыми прогибами при статических нагрузках, колебаниями при динамических нагрузках;

предельное состояние, характеризуемое максимально допустимыми местными повреждениями (деформациями, трещинами). Возможно сочетание различных предельных состояний.

3. Определение прочности элементов и несущей способности конструкции в целом, исходя из напряженного состояния и характера предельного состояния.

При расчете конструкции по допускаемым напряжениям условие прочности имеет вид: $\sigma \leq [\sigma]$, где σ — напряжение в опасном сечении элемента, $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, которое составляет некоторую часть от предела текучести материала σ_T :

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n},$$

где n — коэффициент запаса прочности. В этом расчете в качестве предельного состояния принимается наступление текучести материала. Коэффициент запаса прочности n (гарантирует ненаступление текучести) имеет различные значения в зависимости от ряда условий — характера нагрузки, толщины элементов, марки материала, ответственности конструкции и т. д. Коэффициент запаса прочности относительно предела текучести устанавливают для низкоуглеродистых сталей обычно в пределах 1,35—1,50, иногда больше. Для углеродистой стали обыкновенного качества в обычных строительных конструкциях допускаемое напряжение составляет $[\sigma] = 160$ МПа.

Действующие в элементах конструкции напряжения при осевых нагрузках вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{N}{F},$$

где N — осевое усилие, Н; F — площадь поперечного сечения элемента, м².

Если $\sigma \leq [\sigma]$, элемент конструкции удовлетворяет требованиям прочности. При решении обратной задачи, т. е. при определении требуемого поперечного сечения элемента, расчет ведут, исходя из величины осевого усилия, по выражению

$$F \geq \frac{N}{[\sigma]}.$$

Расчетные усилия в сварных швах N определяют по выражению $N = [\sigma']F$, где $[\sigma']$ — допускаемые напряжения в сварных соединениях, Н/м², F — рабочая площадь сварного шва, м².

Стыковые швы рассчитывают по формуле $N=[\sigma'] Sl$, где S — толщина металла в расчетном сечении, м; l — длина шва, мм. Допускаемое напряжение в стыковом шве принимается равным $0,8—1,0 [\sigma]_p$, где $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение в основном металле при растяжении.

Допускаемое усилие N для угловых лобовых швов рассчитывается по формуле $N=0,7Kl[\tau']$, где K — катет шва, м; l — длина шва, м; $[\tau']$ — расчетное сопротивление срезу, Н/м²;

$$[\tau'] = (0,6 \div 0,65) [\sigma_p].$$

Коэффициент 0,7 показывает, что расчет ведется из предположения разрушения шва по гипотенузе прямоугольного треугольника (форма сечения углового шва).

Максимальное усилие N для угловых фланговых швов рассчитывают по формуле $N=2 \cdot 0,7 \cdot K[\tau']$.

Контрольные вопросы

1. Что называется деформациями и напряжениями?
2. Что является причиной образования сварочных напряжений и деформаций?
3. Какие способы применяют для уменьшения и устранения остаточных сварочных напряжений?
4. Какие способы применяют для уменьшения и устранения сварочных деформаций и короблений?
5. Как рассчитывают прочность сварного шва?

Глава 5. СВАРИВАЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

§ 17. Понятие и показатели свариваемости

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

Различают физическую и технологическую свариваемость.

Физическая свариваемость — свойство материалов давать монолитное соединение с химической связью, такой свариваемостью обладают практически все-технические сплавы и чистые металлы, а также ряд сочетаний металлов с неметаллами.

Технологическая свариваемость — технологическая характеристика металла, определяющая его реакцию на воздействие сварки и способность при этом образовывать сварное соединение с заданными эксплуатационными свойствами.

Свариваемость металла зависит от его химических и физических свойств, кристаллической решетки, степени легирования, наличия примесей и других факторов.

Основные показатели (критерии) свариваемости металлов и их сплавов:

окисляемость металла при сварочном нагреве, зависящая от его химической активности;

сопротивляемость образованию горячих трещин;

сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке;

чувствительность металла к тепловому воздействию сварки, которая характеризуется склонностью металла к росту зерна, структурными и фазовыми изменениями в шве и зоне термического влияния, изменением прочностных и пластических свойств;

чувствительность к образованию пор;

соответствие свойств сварного соединения заданным эксплуатационным требованиям, к таким свойствам относятся: прочность, пластичность, выносливость, ползучесть, вязкость, жаростойкость и жаропрочность, коррозионную стойкость и др.

Кроме перечисленных основных показателей свариваемости имеются еще показатели, от которых зависит качество сварных соединений. К ним относят качество формирования сварного шва, величину собственных напряжений, величину деформаций и коробления свариваемых материалов и изделий.

Технология сварки (вид сварки, сварочные материалы, техника сварки) выбирается в зависимости от основного показателя свариваемости (или сочетаний нескольких показателей) для каждого конкретного материала.

§ 18. Окисляемость металла при сварке, образование пор и включений, чувствительность металла к тепловому воздействию сварки

О к и с л я е м о с т ь металла при сварке определяется химическими свойствами свариваемого материала. Чем химически активнее металл, тем больше его склонность к окислению и тем выше должно быть качество защиты при сварке. К наиболее активным металлам, легко окисляющимся при сварке, относятся титан, цирконий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам. При их сварке необходимо защищать от взаимодействия с воздухом не только расплавленный металл, но и прилегающий к сварочной ванне основной металл и остывающий шов с наружной стороны. Наилучшее качество защиты обеспечивают высокий вакуум и инертный газ высокой чистоты.

Высокой химической активностью при сварке отличаются и другие цветные металлы: алюминий, магний, медь, никель и сплавы на их основе. Качество их защиты обеспечивается инертными газами, а также специальными электродными покрытиями и флюсами.

При сварке сталей и сплавов на основе железа от взаимодействия с воздухом расплавленный металл защищают покрытиями, флюсами, а также защитными газами.

П о р ы в сварных швах возникают при первичной кристаллизации металла сварочной ванны в результате выделения газов. Поры представляют собой заполненные газом полости в швах, имеющие округлую, вытянутую или более сложную форму. Поры могут располагаться по оси шва, его сечению или вблизи границы сплавления.

Они могут выходить или не выходить на поверхность, располагаться цепочкой, отдельными группами или одиночно, могут быть микроскопическими и крупными (до 4—6 мм в поперечнике). Поры при сварке вызываются в основном водородом, азотом и окисью углерода в результате химических реакций с выделением газов; различной растворимостью газов в расплавленном и твердом металле, при этом растворившийся в жидком металле газ выделяется при затвердевании шва с образованием пор; захватом пузырьков газа при кристаллизации сварочной ванны.

Для уменьшения пористости необходима тщательная подготовка основного и присадочного материала под сварку (очистка от ржавчины, масла, влаги, прокатка и т. д.), надежная защита зоны сварки от воздуха, введение в сварочную ванну элементов-раскислителей (из основного металла, сварочной проволоки, покрытия, флюса), соблюдение режимов сварки.

Наряду с порами сплошность металла шва нарушают шлаковые включения. Ш л а к о в ы е в к л ю ч е н и я связаны с тугоплавкостью, повышенной вязкостью и высокой плотностью шлаков; плохой зачисткой поверхности кромок и отдельных слоев при многослойной сварке; затеканием шлака в зазоры между свариваемыми кромками и в места подрезов. Помимо шлаковых включений в шве могут быть микроскопические оксидные, сульфидные, нитридные, фосфорсодержащие включения, которые ухудшают свойства сварного шва.

Чувствительность металла к тепловому воздействию сварки является одним из главных показателей свариваемости. В сварном соединении под действием термического цикла сварки происходят рост зерна, структурные и фазовые превращения в шве и зоне термического влияния, изменение прочностных и пластических свойств. Как правило, чем выше прочность свариваемого материала и больше степень его легирования, тем чувствительнее материал к термическому циклу сварки и сложнее технология его сварки.

Чувствительность металла к тепловому воздействию сварки оценивают по свойствам различных зон соединений и сварных соединений в целом при статических, динамических и вибрационных испытаниях (растяжение, изгиб, определение твердости, определение перехода металла в хрупкое состояние и др.), а также по результатам металлографических исследований в зависимости от применяемых видов и режимов сварки.

§ 19. Горячие и холодные трещины при сварке

Г о р я ч и е т р е щ и н ы — хрупкие межкристаллические разрушения металла шва и околошовной зоны, возникающие в твердо-жидком состоянии в процессе кристаллизации, а также при высоких температурах в твердом состоянии.

При кристаллизации жидкий металл шва сначала переходит в жидко-твердое, а затем в твердо-жидкое и, наконец, в твердое состояние.

В твердо-жидком состоянии образуется скелет из кристаллитов затвердевшего металла (твердой фазы), в промежутках которого находится жидкий металл, который в таком состоянии обладает очень низкой деформационной способностью и малой прочностью. Когда металл полностью закристаллизуется, его пластичность и прочность возрастают. Температурный интервал, в котором металл находится в твердо-жидком состоянии, характеризующийся очень низкой прочностью и пластичностью, называется температурным интервалом хрупкости. При охлаждении одновременно с процессами кристаллизации в этом температурном интервале в связи с усадкой шва и

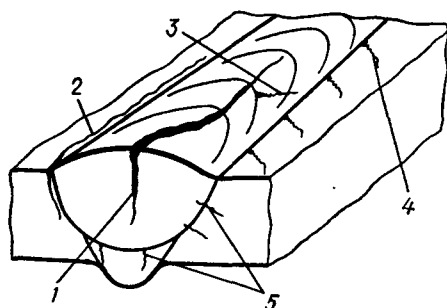


Рис. 23. Горячие трещины в сварных соединениях:

1, 2 — продольные, 3, 4 — поперечные в шве и околошовной зоне, 5 — поперечные трещины по толщине свариваемого металла

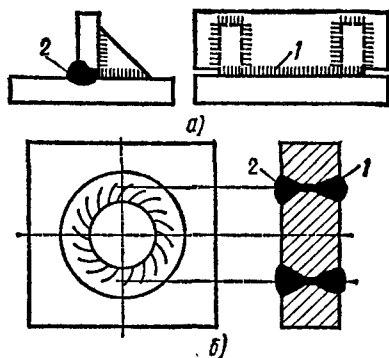


Рис. 24. Технологические пробы для определения сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин:

а — тавровая с ребрами жесткости, б — кольцевая

линейным сокращением нагретого металла в шве начинают накапливаться внутренние деформации, которые приводят к образованию горячих трещин.

Горячие трещины могут образовываться как вдоль, так и поперек шва (рис. 23).

Для оценки свариваемости металлов по критерию сопротивляемости горячим трещинам применяют два основных вида испытаний — сварку технологических проб и машинные способы испытаний.

В технологических пробах сваривают узел или образец заданной жесткости. Пригодность материала, электродов, режимов сварки оценивают по появлению трещины и ее длине. Примером технологических проб может служить кольцевая проба и тавровая проба с ребрами жесткости (рис. 24). Сначала сваривают шов 1, затем 2, визуально определяют, появляется ли трещина во втором шве.

В машинных методах испытаний растягивают или изгибают образец во время сварки. Эта внешняя (машинная) деформация имитирует сварочную деформацию. Склонность материалов оценивают по критической величине или скорости деформирования, при которых возникает трещина. Чем выше скорость деформирования (температура)

деформации), при которой образуется трещина, тем выше сопротивляемость материала образованию горячих трещин при сварке.

Холодные трещины — локальные межкристаллические разрушения, образующиеся в сварных соединениях преимущественно при нормальной температуре, а также при температурах ниже 200°C.

Причины холодных трещин при сварке:
 охрупчивание металла вследствие закалочных процессов при быстром его охлаждении;
 остаточные напряжения, возникающие в сварных соединениях;
 повышенное содержание водорода в сварных швах, который усиливает неблагоприятное действие первых двух главных причин.

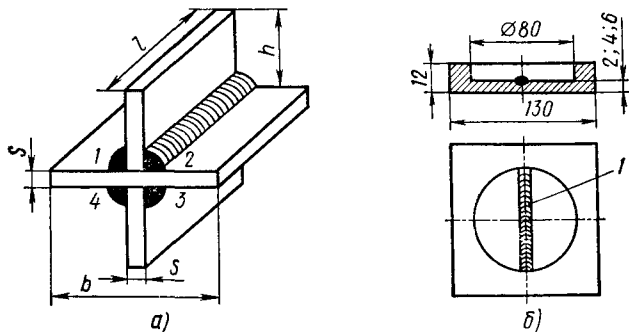


Рис. 25. Технологические пробы для определения сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин:

a — крестовая, *б* — Кировского завода; 1, 2, 3, 4 — последовательность наложения швов

Для оценки свариваемости металлов по критерию сопротивляемости холодным трещинам применяют, как и при оценке сопротивляемости горячим трещинам, два вида испытаний — технологические пробы и методы количественной оценки с приложением к образцам внешней механической нагрузки.

Преимуществом технологических проб является возможность моделировать технологию сварки и, следовательно, судить о сопротивляемости образованию трещин в условиях, близких к реальным. Проба представляет собой жесткое сварное соединение. Стойкость материала оценивают качественно по наличию или отсутствию трещин. Примерами проб могут служить крестовая проба и проба Кировского завода (рис. 25).

В крестовой пробе цифрами показана последовательность наложения швов. В наиболее жестких условиях находится последний 4-й шов, где и возможно образование трещин.

В пробе Кировского завода, изменяя толщину металла в зоне выточки, а также применяя дополнительные подогрев или охлаждение, меняют скорость охлаждения металла при сварке и степень его подкалки. По этим показателям судят о сопротивляемости металла образованию холодных трещин.

Существует ряд других технологических проб, в которых имитируют жесткие узлы сварных конструкций. Общим недостатком технологических проб является отсутствие количественных показателей стойкости металла, так как пробы дают только качественный ответ — образуется или не образуется трещина.

Количественным критерием оценки сопротивляемости сварного соединения образованию холодным трещинам являются минимальные внешние напряжения, при которых начинают возникать холодные трещины при выдержке образцов под нагрузкой, прокладываемой сразу же после сварки. Внешние нагрузки воспроизводят воздействие на металл собственных сварочных и усадочных напряжений, которые постоянно действуют сразу после сварки при хранении и эксплуатации конструкции.

Методы борьбы с холодными трещинами основываются на уменьшении степени подкалки металла, снятии остаточных напряжений, ограничении содержания водорода.

§ 20. Коррозионная стойкость сварных соединений

Коррозией называется разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней средой.

По характеру разрушения различают следующие основные виды коррозии: общую, местную, коррозию под напряжением. Если коррозией охвачена вся поверхность металла, такой вид разрушения называют общей или сплошной коррозией, общая коррозия может быть равномерной или неравномерной в зависимости от глубины поражения на отдельных участках.

При местной коррозии происходит разрушение отдельных участков поверхности металла. Наиболее характерными видами местной коррозии являются коррозия в виде пятен, язв, точечная и подповерхностная, межкристаллитная и транскристаллитная. Наиболее опасный вид местной коррозии — это межкристаллитная коррозия, которая, не разрушая зерен металла, продвигается вглубь по их менее стойким границам.

Однако наиболее опасным видом разрушения является коррозионное разрушение при совместном действии механических напряжений и среды — коррозионное растрескивание и коррозионная усталость. Напряжения облегчают разрушение защитных пленок и способствуют локализации разрушения в виде коррозионно-механических трещин.

Сварные соединения более подвержены коррозионным поражениям по сравнению с основным металлом в связи со структурными изменениями металла, неоднородностью структуры и свойств, наличием остаточных напряжений и деформаций.

Различные виды коррозионных разрушений сварных соединений показаны на рис. 26.

Общая коррозия оценивается по массовым потерям или глубине коррозии за определенный период времени, местная коррозия — по

глубине коррозии и степени изменения механических свойств металла вследствие воздействия среды.

Коррозионное растрескивание оценивается по времени до разрушения образцов, выдерживаемых в среде под нагрузкой, и величине напряжений, при которых начинается коррозионно-механическое разрушение. Повышение сопротивляемости сварных соединений коррозионному разрушению основано на использовании общих (как и для основного металла) и специальных методов.

К общим методам относятся использование материалов с повышенной коррозионной стойкостью, уменьшение напряженного состо-

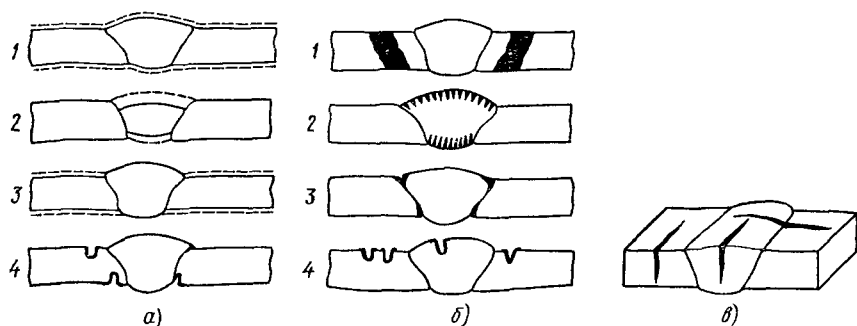


Рис. 26. Виды коррозионных разрушений сварных соединений:

a — общая коррозия; 1 — равномерная сварного соединения; 2 — сосредоточенная на шве, 3 — ускоренная основного металла, 4 — сосредоточенная в зоне термического влияния; *б* — местная коррозия; 1 — межкристаллитная коррозия в зоне термического влияния, 2 — в шве, 3 — в зоне сплавления (ножевая коррозия), 4 — точечная коррозия; *в* — коррозионное растрескивание и усталость

стояния, применение защитных покрытий, замедлителей (ингибиторов) коррозии, добавляемых в коррозионную среду или на поверхность металла.

К специальным методам относятся применение сварочных проволок, дающих сварной шов более коррозионно-стойкий, чем основной металл; регулирование режимов сварки с целью получения благоприятных структур в зоне термического влияния; уменьшение концентрации напряжений; снятие остаточных сварочных напряжений.

§ 21. Свариваемость сталей

Свариваемость сталей зависит от степени легирования, структуры и содержания примесей. Наибольшее влияние на свариваемость сталей оказывает углерод. С увеличением содержания углерода, а также ряда других легирующих элементов свариваемость сталей ухудшается. Для сварки конструкций в основном применяют конструкционные низкоуглеродистые, низколегированные, а также среднелегированные стали. Главными трудностями при сварке этих сталей являются:

чувствительность к закаливанию и образованию холодных трещин;

склонность к образованию горячих трещин;

обеспечение равнопрочности сварного соединения.

Чем выше содержание углерода в стали, тем выше опасность холодных и горячих трещин и труднее обеспечить равнопрочность сварного соединения. Ориентировочным количественным показателем свариваемости стали известного химического состава является эквивалентное содержание углерода, которое определяется по формуле

$$C_s = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15},$$

где содержание углерода и легирующих элементов дается в процентах.

В зависимости от эквивалентного содержания углерода и связанной с этим склонности к закалке и образованию холодных трещин стали по свариваемости делят на четыре группы: хорошо, удовлетворительно, ограниченно и плохо свариваемые стали (табл. 2).

2. Классификация сталей по свариваемости

Группа свариваемости	Сталь	
	углеродистая	конструкционная легированная
1. Хорошая	Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, 08; Сталь 10, 15, 20, 25, 12кп, 15кп, 16кп, 18кп, 20кп	15Г, 20Г, 15Х, 15ХА, 20Х, 15ХМ, 14ХГС, 10ХСНД, 10ХГСНД, 15ХСНД
2. Удовлетворительная	Ст5; Сталь 30, 35	12ХН2, 12ХН3А, 14Х2МР, 10Г2МР, 20ХН3А, 20ХН, 20ХГСА, 25ХГСА, 30Х, 30ХМ
3. Ограниченная	Ст6; Сталь 40, 45, 50	35Г, 40Г, 45Г, 40Г2, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХН, 40ХМФА, 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГСМ, 35ХМ, 20Х2Н4А, 4ХС, 12Х2Н4МА
4. Плохая	Сталь 65, 70, 75, 80, 85, У7, У8, У9, У10, У11, У12	50Г, 50Г2, 50Х, 50ХН, 45ХНЗМФА, 6ХС, 7ХЗ, 9ХС, 8ХЗ, 5ХНТ, 5ХНВ

Стали первой группы имеют $C_s \leq 0,25\%$, хорошо свариваются без образования закалочных структур и трещин в широком диапазоне режимов, толщин и конструктивных форм. Удовлетворительно свариваемые стали ($C_s = 0,25 \div 0,35\%$) мало склонны к образованию холодных трещин при правильном подборе режимов сварки, в ряде случаев требуется подогрев. Ограниченно свариваемые стали ($C_s = 0,36 \div 0,45\%$) склонны к трещинообразованию, возможность регулирования сопротивляемости образованию трещин изменением режимов сварки ограничена, требуется подогрев. Плохо свариваемые

щиеся стали ($C_s > 0,45\%$) весьма склонны к закалке и трещинам, требуют при сварке подогрева специальных технологических приемов сварки и термообработки.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под свариваемостью материалов?
2. Что является причиной образования пор в сварных швах?
3. Каковы причины образования горячих и холодных трещин при сварке?
4. Какие виды коррозии бывают в сварных соединениях?
5. Как влияет химический состав сталей на их свариваемость?

Часть II

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, РЕЗКИ

Глава 6. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 22. Стальная сварочная и наплавочная проволока

ГОСТ 2246—70 предусматривает 77 марок стальной сварочной проволоки разного химического состава; 6 марок из низкоуглеродистой стали (Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10Г2); 30 марок из легированной стали (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-18ХГС и др.); 41 марка из высоколегированной стали (Св-12Х11НМФ, Св-10Х17Т, Св-06Х19Н9Т и др.).

В легированной стали легирующих элементов содержится от 2,5 до 10%, в высоколегированной — более 10%.

Буква и цифры в написании марок проволоки означают: Св — сварочная, цифра после Св — содержание углерода в сотых долях процента (например, 08 означает 0,08% углерода), А — пониженное, АА — еще более пониженное содержание серы и фосфора; буквы — условные обозначения легирующих элементов; цифры после буквенных обозначений — среднее содержание легирующих элементов в процентах.

Химические элементы в сталях условно обозначаются следующим образом: алюминий (Al) — Ю, азот (N) — А (только в высоколегированных сталях), бор (B) — Р, ванадий (V) — Ф, вольфрам (W) — В, кремний (Si) — С, кобальт (Co) — К, марганец (Mn) — Г, медь (Cu) — Д, молибден (Mo) — М, никель (Ni) — Н, ниобий (Nb) — Б, титан (Ti) — Т, хром (Cr) — Х, цирконий (Zr) — Ц.

Стальную сварочную проволоку, предназначенную для всех видов сварки плавлением и изготовления электродов, выпускают по ГОСТ 2246—70 следующих диаметров: 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 и 12,0 мм.

Проволока поставляется свернутой в мотки с внутренним диаметром от 150 до 750 мм, массой от 1,5 до 40 кг, а также намотанной на катушки и кассеты (для автоматической и полуавтоматической сварки).

Стальная наплавочная проволока по ГОСТ 10543—75 изготавливается диаметрами от 0,3 до 8,0 мм: из углеродистой стали — 9 марок (Нп-25, Нп-30, Нп-40 и др.), из легированной стали — 11 марок (Нп-40Г, Нп-50Г, Нп-30ХГСА и др.), из высоколегированной стали — 11 марок (Нп-20Х14, Нп-30Х13, Нп-30Х10Г10Т и др.). Проволока используется для наплавки под флюсом, в защитных газах, электрошлаковой наплавки и изготовления покрытых электродов для ручной наплавки. Марку проволоки выбирают в зависи-

мости от назначения и требуемой твердости металла наплавленного слоя.

Используемая для наплавки обрезаемая холоднокатаная лента в большинстве случаев имеет толщину от 0,4 до 1,0 мм при ширине от 20 до 100 мм. Ленту поставляют в рулонах.

Порошковая проволока и лента. Порошковая проволока представляет собой трубчатую (часто со сложным внутренним сечением) проволоку, заполненную порошкообразным наполнителем — шихтой. Оболочку порошковой проволоки изготовляют из стальной (чаще низкоуглеродистой) ленты толщиной 0,2—0,5 мм. Наполнитель представляет собой смесь порошков из газо- и шлакообразующих компонентов, а также легирующих компонентов, которые обеспечивают защиту зоны сварки и требуемые свойства сварного шва. Наиболее широко используют порошковую проволоку диаметром от 1,6 до 3,0 мм.

В зависимости от состава шихты порошковую проволоку можно использовать для механизированной сварки и наплавки сталей и чугуна как без защиты, так и с дополнительной защитой (флюсом, защитным газом) от воздуха.

Для сварки углеродистых и легированных сталей применяют порошковые проволоки ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН6 и др., при сварке открытой дугой ПП-АН4, ПП-АН5, ПП-АН8, ПП-АН9 — при сварке в углекислом газе.

Преимуществом порошковой проволоки является возможность за счет наполнителя в широких пределах регулировать химический состав шва, что используется при наплавке. Ими можно наплавлять изделия под флюсом, в защитных газах и открытой дугой. Разработаны порошковые проволоки ПП-АН120, ПП-АН121, ПП-АН122 — для наплавки под флюсом деталей машин из углеродистых сталей, ПП-АН105 — для наплавки высокомарганцовистых сталей, ПП-АН170 — для наплавки высокохромистых сталей, порошковые ленты ПЛ-АН101, ПЛ-АН102 и др. При дуговой наплавке порошковыми проволоками и лентами применяют меньшие плотности тока по сравнению с электродами сплошного сечения, что обеспечивает меньшую глубину проплавления и меньшее перемешивание наплавленного металла с основным.

§ 23. Electrodes для ручной дуговой сварки и наплавки

Плавающиеся электроды. Эти электроды для ручной дуговой сварки представляют собой стержни длиной до 450 мм из сварочной проволоки, на которую нанесен слой покрытия — смесь веществ для усиления ионизации, защиты от вредного воздействия воздуха и металлургической обработки сварочной ванны. В покрытие входят следующие компоненты:

газообразующие — неорганические вещества (мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 и др.) и органические вещества (крахмал, пищевая мука, декстрин);

ионизирующие или стабилизирующие — различные соединения, в состав которых входит калий, натрий, кальций и др. (мел, полевой шпат, гранит и т. п.);

шлакообразующие, составляющие основу покрытия, — обычно это руды (марганцевая, титановая), минералы (ильменитовый и рутиловый концентрат, полевой шпат, кремнезем, гранит, мел, плавленый шпат и др.);

легирующие элементы и элементы-раскислители — кремний, марганец, титан и др., используемые в виде сплавов этих элементов с железом, так называемых ферросплавов; алюминий вводится в покрытие в виде порошка — пудры;

связующие компоненты — водные растворы силикатов натрия и калия, называемые натриевым или калиевым жидким стеклом, а также натриево-калиевым жидким стеклом;

формовочные добавки — вещества, придающие покрытию лучшие пластические свойства (бетонит, каолин, декстрин, слюда и др.).

Для повышения производительности сварки в покрытие добавляют железный порошок до 60% массы покрытия.

К л а с с и ф и к а ц и я с т а л ь н ы х п о к р ы т ы х э л е к т р о д о в. Металлические электроды для дуговой сварки сталей и наплавки изготовляют в соответствии с ГОСТ 9466-75 «Электроды покрытые металлическими для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация, размеры и общие технические требования». Стальные покрытые электроды для ручной дуговой сварки и наплавки подразделяются по назначению (ГОСТ 9467-75):

для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 600 МПа. ГОСТ предусматривает девять типов электродов (Э38, Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А, Э55, Э60), обозначаются общим индексом У;

для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 600 МПа — 5 типов (Э70, Э85, Э100, Э125, Э150), индекс Л;

для сварки легированных теплоустойчивых сталей — девять типов, индекс Т;

для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — 49 типов (ГОСТ 10052—75), индекс В;

для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — 44 типа (ГОСТ 10051—75), индекс Н.

Цифры в обозначениях типов электродов для сварки конструкционных сталей означают гарантируемый предел прочности металла шва.

По виду покрытия электроды классифицируются: с кислым покрытием А; основным Б.; целлюлозным Ц; рутиловым Р; смешанного вида — соответствующее двойное обозначение, прочими видами покрытий П. Если покрытие содержит железный порошок в количестве более 20%, к обозначению вида покрытия добавляют букву Ж.

Кислые покрытия А (электроды АНО-2, СМ-5 и др.) состоят в основном из окислов железа и марганца (обычно в виде руды), кремне-

зема, ферромарганца. Электроды с кислым покрытием технологичны, однако наличие окислов марганца делает их токсичными.

Рутиловые покрытия Р (электроды АНО-3, АНО-4, ОЗС-3, ОЗС-4, ОЗС-6, МР-3, МР-4 и др.) имеют в своем составе преобладающее количество рутила TiO_2 . Рутиловые покрытия технологичны, менее вредны для дыхательных органов сварщика, чем другие.

Целлюлозные покрытия Ц (электроды ВСЦ-1, ВСЦ-2, ОЗЦ-1 и др.) состоят из целлюлозы, органической смолы, ферросплавов, талька и др. Эти покрытия удобны для сварки в любом пространственном положении, но дают наплавленный металл пониженной пластичности.

Основные покрытия Б (электроды УОНИ-13/45, УП-1/45, ОЗС-2, ДСК-50 и др.) не содержат окислов железа и марганца. Например, покрытие марки УОНИ-13/45 состоит из мрамора, плавикового шпата, кварцевого песка, ферросилиция, ферромарганца, ферротитана, жидкого стекла. Металл шва, выполненный электродом с основным покрытием, обладает большей пластичностью. Этими электродами варят ответственные конструкции.

По толщине покрытия в зависимости от отношения диаметра электрода (D) к диаметру стального стержня (d) различают электроды:

с тонким покрытием ($D/L \leq 1,20$) — М;

со средним покрытием ($1,20 < D/d \leq 1,45$) — С;

с толстым покрытием ($1,45 < D/d \leq 1,80$) — Д;

с особо толстым покрытием ($D/d > 1,80$) — Г.

По качеству, т. е. точности изготовления, состоянию поверхности покрытия, сплошности выполненного данными электродами металла шва, по содержанию серы и фосфора в наплавленном металле электроды делят на группы 1, 2 и 3. Чем выше номер, тем лучше качество.

По допустимым пространственным положениям сварки и наплавки электроды делятся на следующие группы: 1 — для всех положений; 2 — для всех положений, кроме вертикального сверху вниз; 3 — для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх; 4 — для нижнего и нижнего в лодочку.

Неплавящиеся электроды. Эти электроды служат для возбуждения и поддержания горения дуги. В основном используют вольфрамовые, реже угольные и графитовые электроды.

Для повышения устойчивости горения дуги и стойкости электрода в состав вольфрамового электрода вводят обычно 1,5—3% окислов активирующих редкоземельных металлов (тория, лантана, иттрия), повышающих эмиссионную способность электрода.

В качестве электродов для сварки применяют вольфрамовые прутки диаметром 0,2—12 мм, выпускаемые промышленностью: вольфрам чистый (ЭВЧ), вольфрам торированный (содержащий торий — ЭВТ5, ЭВТ10, ЭВТ15), вольфрам лантанированный (ЭВЛ10, ЭВЛ20), вольфрам иттрированный (ЭВИ30).

Угольные и графитовые электроды (стержни) изготавливают из электротехнического угля или синтетического графита диаметром

от 4 до 18 мм и длиной от 250 до 700 мм. Графитовые электроды имеют лучшую электропроводность и более стойки против окисления при высоких температурах, чем угольные электроды.

§ 24. Сварочные флюсы

Сварочным флюсом (ГОСТ 9087—69) называется неметаллический материал, расплав которого необходим для сварки и улучшения качества шва. Флюс для дуговой сварки защищает дугу и сварочную ванну от вредного воздействия окружающего воздуха и осуществляет металлургическую обработку сварочной ванны. Флюс должен обеспечивать хорошее формирование и надлежащий химический состав шва, высокие механические свойства сварных соединений, отсутствие пор и трещин, устойчивость процесса сварки, легкую отделяемость шлаковой корки от поверхности шва.

По способу изготовления флюсы разделяют на плавленные и неплавленные. *П л а в л е н ы й ф л ю с* — сварочный флюс, полученный сплавлением его составляющих. Сплавленную массу после охлаждения подвергают дроблению на зерна требуемого размера. *Н е п л а в л е н ы е ф л ю с ы* представляют собой механическую смесь порошкообразных и зернистых материалов. К ним относятся и керамические флюсы для дуговой сварки, получаемые перемешиванием порошкообразных материалов со связующим веществом.

Преимуществом плавленных флюсов являются высокие технологические свойства (защита, формирование, отделяемость шлаковой корки и др.) и малая стоимость. Преимуществом керамических флюсов является возможность в более широких пределах легировать металл шва через флюс. В настоящее время наша промышленность применяет преимущественно плавленные флюсы.

Плавленные флюсы различают по содержанию в них окислов различных элементов. По содержанию окиси кремния SiO_2 флюсы разделяются на высококремнистые (до 40—45% SiO_2), низкокремнистые (до 0,5% SiO_2) и бескремнистые.

По содержанию окиси марганца (MnO) на высокомарганцевые (содержащие более 30% MnO), среднемарганцевые (содержащие MnO в пределах 15—30%) и низкомарганцевые.

Низкокремнистые флюсы применяют обычно для сварки легированных сталей.

Для сварки низкоуглеродистой стали применяют преимущественно низкоуглеродистую сварочную проволоку в сочетании с высококремнистым марганцовистым флюсом.

Примером современных высококремнистых марганцовистых флюсов могут служить флюсы ОСЦ-45 и АН-348-А, шихта которых состоит из марганцевой руды (MnO), кварцевого песка (SiO_2) и плавленого шпата (фтористого кальция CaF_2).

По структуре зерен флюсы делятся на стекловидные (плотные) с объемной массой 1,3—1,8 кг/дм³ и пемзовидные (пористые). В зависимости от диаметра сварочной проволоки флюс одного и того же состава применяют с зёрнами различной величины. Для сварки про-

волокой диаметром менее 3 мм применяют стекловидный мелкозернистый флюс с размером зерен менее 0,25—1,0 мм, а для сварки проволокой диаметром 3 мм и более — с размером зерен 0,35—3,0 мм в поперечнике.

По назначению различают флюсы для сварки низкоуглеродистых, легированных, специальных сталей и цветных металлов. Марганцевые высококремнистые флюсы применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей с соответствующими сварочными проволоками; низкокремнистые флюсы с повышенным содержанием CaO , MgO и CaF_2 , шлаки которых имеют слабокислый характер — для сварки легированных сталей. Для сварки высоколегированных сталей с большим содержанием таких легкоокисляющихся элементов, как хром, молибден, титан, алюминий и др., применяют бескремнистые флюсы на основе соединений CaO , CaF_2 и Al_2O_3 и бескислородные фторидные флюсы, состоящие из 60—70% CaF_2 . Шлаки этих флюсов имеют основной или нейтральный характер. Для цветных металлов и сплавов разработаны флюсы с учетом химических свойств и свариваемости. Например, при сварке титана используют флюсы системы CaF_2 — BaCl_2 — NaF , не содержащие кислородных соединений, чтобы предотвратить окисление титана.

Для электрошлаковой сварки используют обычные флюсы (например, АН-348А, ФЦ-7), а также специальные флюсы, образующие электропроводный расплав с заданными технологическими свойствами: вязкостью, электропроводностью, температурой плавления и т. д. (АН-8, АН-22 и др.).

Для автоматической и полуавтоматической наплавки под флюсом применяют те же флюсы, что и для сварки.

Наиболее распространены плавленые флюсы АН-348А, ОСЦ-45, АН-20, АН-60, 48-ОФ-6, АН-26, АН-15М, АН-8, АН-25 в сочетании с легированными проволоками.

Флюсы для газовой сварки представляют собой легкоплавкие флюсы в виде порошка или пасты, очищающие при сварке поверхность металла. В качестве флюсов используют буру, борную кислоту, окислы и соли бария, калия, лития, натрия, фтора и др.

§ 25. Защитные газы

Защитные газы защищают дугу и сварочную ванну от вредного воздействия окружающей среды. В качестве защитных газов применяют инертные и активные газы, а также их смеси.

Инертными газами называются те, которые химически не взаимодействуют с металлом и не растворяются в нем. В качестве инертных газов используют аргон (Ar), гелий (He) и их смеси. Инертные газы применяют для сварки химически активных металлов (титан, алюминий, магний и др.), а также во всех случаях, когда необходимо получать сварные швы, однородные по составу с основным и присадочным металлом (высоколегированные стали и др.). Инертные газы обеспечивают защиту дуги и свариваемого металла, не оказывая на него металлургического воздействия.

Аргон поставляется по ГОСТ 10157—73 «Аргон газообразный и жидкий» следующих сортов с содержанием аргона не менее (%): высшего сорта (99,99), 1-го сорта (99,98), 2-го сорта (99,95), остальное (%) — кислород ($\leq 0,005$), азот ($0 \leq 0,004$), влага ($\leq 0,03$). Гелий выпускают по МРТУ 51-04-23—64 состава (%): марка I (99,6—99,7), марка II (98,5—99,5), остальное азот. Аргон и гелий поставляют в баллонах вместимостью 40 л под давлением 15,0 МПа. Баллон для аргона окрашен в серый цвет, надпись — зеленого цвета. Баллон для гелия — коричневого, надпись — белого цвета.

В связи с тем, что гелий в 10 раз легче аргона, расход гелия при сварке увеличивается в 1,5—2 раза.

По отношению к меди инертным является также азот (N_2), который поставляется по ГОСТ 9293—74 «Азот газообразный и жидкий» в газообразном состоянии четырех сортов (состав, %): высший — 99,9, 1-й — 99,5, 2-й — 99,0 и 3-й — 97,0, остальное — примеси.

Активными защитными газами называют газы, вступающие в химическое взаимодействие со свариваемым металлом и растворяющиеся в нем (углекислый газ, водород, пары воды и др.).

Основным активным защитным газом является углекислый газ, который поставляется по ГОСТ 8050—76 «Двуокись углерода газообразная и жидкая». Для сварки используют сварочный углекислый газ чистотой 99,5%.

Углекислый газ хранят и транспортируют в жидком виде преимущественно в стальных баллонах емкостью 40 л под давлением 6,0—7,0 МПа. В баллоне находится 60—80% жидкой углекислоты, а остальное — испарившийся газ. Цвет баллона — черный, надпись — желтого цвета.

Смеси газов обладают в ряде случаев лучшими технологическими свойствами, чем отдельные газы. Например, смесь углекислого газа с кислородом (2—5%) способствует мелкокапельному переносу металла, уменьшению разбрызгивания (на 30—40%), улучшению формирования шва. Смесь из 70% He и 30% Ar увеличивает производительность сварки алюминия, улучшает формирование шва и позволяет сваривать за один проход металл большей толщины.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют и обозначают сварочные проволоки?
2. Как классифицируют стальные покрытые электроды для сварки и наплавки?
3. Что такое тип и марка электрода?
4. Какие неплавящиеся электроды применяют для сварки?
5. Для каких целей используют сварочный флюс?
6. Какие защитные газы используют при сварке?

**§ 26. Обеспечение устойчивости горения сварочной дуги,
требования к источникам питания**

Устойчивость горения сварочной дуги. В сварочную систему при дуговой сварке входят источник питания, дуга и ванна расплавленного металла (изделие). Высокое качество сварного соединения обеспечивается в том случае, если вся система работает во время сварки устойчиво, стабильно во всех трех ее звеньях и прежде всего, если обеспечивается устойчивое горение дуги.

Однако в процессе сварки на перемещающуюся по металлу дугу действуют факторы, нарушающие ее устойчивое горение, такие, как изменение длины дуги, которое зависит от квалификации сварщика, качество сборки, перенос капель жидкого металла в сварочную ванну, изменение величины сварочного тока при колебаниях напряжения сети, изменение скорости сварки, магнитное дутье дуги (отклонение дуги под действием электромагнитных полей и ферромагнитных масс) и другие факторы.

Устойчивость дуг переменного тока ниже, чем дуг постоянного тока. Это связано с тем, что при питании дуги с частотой 50 Гц дуга 100 раз в секунду гаснет и вновь возбуждается. Для повышения стабильности горения дуги в покрытия и флюсы вводят вещества (соединения калия, кальция, цезия и др.), способствующие хорошей проводимости дугового промежутка. Применяют также специальные устройства, называемые осцилляторами и генераторами импульсов, которые способствуют возбуждению дуги синхронно с частотой питающей сети.

Требования к источникам питания для дуговой сварки. Для обеспечения устойчивости горения дуги источники питания для дуговой сварки должны удовлетворять следующим требованиям:

иметь напряжение холостого хода, т. е. напряжение на зажимах источника тока при разомкнутой сварочной цепи, достаточное для легкого возбуждения дуги и устойчивого ее горения, но не превышать норм техники безопасности, т. е. не более 80—90 В;

обладать достаточной мощностью для выполнения сварочных работ;

обеспечивать ток короткого замыкания, не превышающий установленных значений, чтобы источник тока выдерживал продолжительные короткие замыкания сварочной цепи без перегрева и повреждения обмотки, при достаточной стабильности процесса;

обладать хорошими динамическими свойствами, т. е. обеспечивать быстрое восстановление напряжения дуги после коротких замыканий;

иметь устройства для плавного регулирования силы сварочного тока;

обладать заданной внешней характеристикой.

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока — сварочные трансформаторы и источники постоянного тока — сварочные генераторы с приводом от электродвигателя (сварочные преобразователи), сварочные генераторы с приводом от двигателя внутреннего сгорания (сварочные агрегаты) и полупроводниковые сварочные выпрямители.

Сварочные трансформаторы благодаря своим технико-экономическим показателям имеют преимущества по сравнению с источниками постоянного тока. Они проще в эксплуатации, долговечнее, обладают более высоким к. п. д.

Источники постоянного тока предпочтительнее в технологическом отношении: при их применении повышается устойчивость горения дуги, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях и др.

Основные технические показатели источников питания сварочной дуги — внешняя характеристика, напряжение холостого хода, относительная продолжительность работы (ПР) и относительная продолжительность включения (ПВ) в прерывистом режиме.

Величина ПР определяется как отношение продолжительности рабочего периода источника питания к длительности полного цикла работы и выражается в процентах

$$\text{ПР}\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100\%,$$

где t_p — непрерывная работа под нагрузкой (сварка); $t_{\text{ц}}$ — длительность полного цикла (сварка + пауза). Оптимальная величина ПР принята 60%. Различие между ПР и ПВ состоит в том, что в первом случае источники питания во время пауз не отключаются от сети и при разомкнутой сварочной цепи работают на холостом ходу, а во втором случае источники полностью отключаются от сети, что имеет место при механизированной сварке.

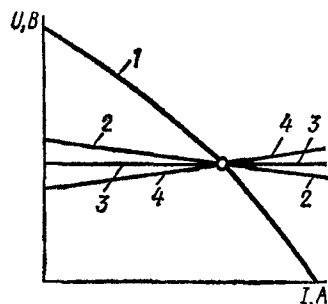


Рис. 27. Основные типы внешних характеристик источников питания для дуговой сварки

Внешняя характеристика источника питания и вольт-амперная характеристика дуги. Источники тока для питания сварочной дуги должны иметь специальную сварочную внешнюю характеристику. Внешней характеристикой источника питания называется зависимость между напряжением на его выходных клеммах и током в сварочной цепи. Внешние характеристики (рис. 27) могут быть следующих основных видов —

крутопадающая 1, пологопадающая 2, жесткая 3, возрастающая 4. Источники тока с соответствующей внешней характеристикой выбирают в зависимости от вольт-амперной характеристики дуги.

Вольт-амперной характеристикой ВАХ дуги называется зависимость напряжения дуги от сварочного тока (рис. 28). ВАХ имеет

три области — падающую I, жесткую II и возрастающую III. Это связано с тем, что для дугового разряда сопротивление не является постоянным, так как количество заряженных частиц в нем зависит от интенсивности ионизации, главным образом от тока. Поэтому электрическая дуга в газах не подчиняется закону Ома и вольт-амперная характеристика является обычно нелинейной. При малых

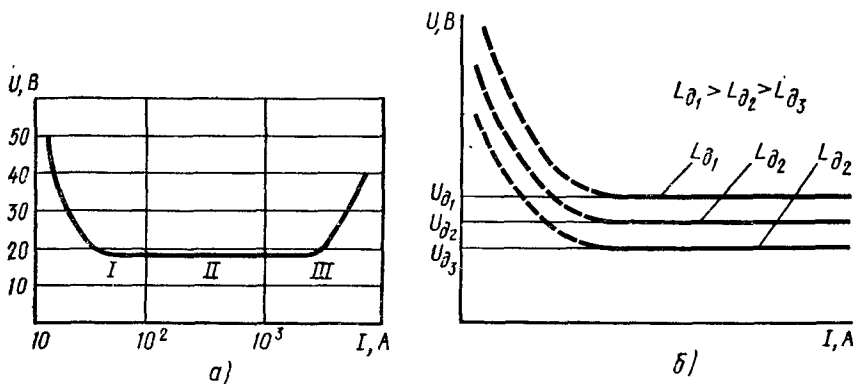


Рис. 28. Вольт-амперная характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги U_d от ее длины L_d (б)

токах до 100 А (I область) с увеличением тока интенсивно растет число заряженных частиц, главным образом в результате разогрева и роста эмиссии катода, сопротивление столба дуги уменьшается, поэтому падает потребное для поддержания разряда напряжение и характеристика дуги является падающей. При дальнейшем росте тока (II область) столб дуги начинает сжиматься, объем газа, участвующего в переносе заряда, уменьшается, это приводит к меньшей скорости роста числа заряженных частиц. Поэтому напряжение дуги становится мало зависящим от тока, а характеристика становится пологой и жесткой. Дальнейшее увеличение тока характеризуется сильным сжатием столба дуги (III область) и вольт-амперная кривая становится возрастающей, что указывает на увеличение энергии, расходуемой внутри дуги.

Участки I и II ВАХ соответствуют режимам сварки, применяемым при ручной сварке плавящимся покрытым электродом, а также неплавящимся электродом в среде защитных газов. Механизированная сварка под флюсом соответствует II области и частично захватывает III область при использовании тонких электродных проволок и повышенной плотности тока, сварка плавящимся электродом в защитных газах соответствует III области ВАХ. Для питания дуги с падающей или жесткой ВАХ применяют источники питания с падающей или пологопадающей внешней характеристикой. Для питания дуги с возрастающей ВАХ применяют источники тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой.

На рис. 29 изображены крутопадающая 1 и жесткая 2 характеристики источников питания и возрастающая вольт-амперная характеристика дуги, соответствующая III области ВАХ. Точка А пересечения характеристик дуги и источника — точка устойчивого горения дуги, которой соответствует рабочий ток I_p и напряжение U_p , l_1 — начальная длина дуги для устойчивого горения.

Предположим, что длина дуги изменилась и из положения l_1 заняла положение l_2 , т. е. дуга укоротилась. Меньшей длине дуги

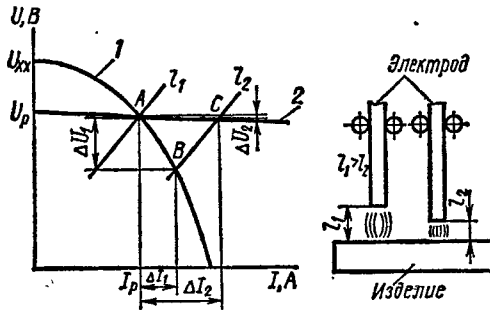


Рис. 29. Изменение параметров режима сварки в зависимости от внешней характеристики источника питания и длины дуги

соответствует меньшее напряжение, большей длине дуги — большее напряжение. При крутопадающей характеристике 1, как видно из рисунка, в значительной степени изменится напряжение на дуге ΔU_1 и в меньшей степени ток дуги ΔI_1 . При жесткой характеристике 2, наоборот, изменение длины дуги ведет к резкому увеличению тока ΔI_2 и к незначительному изменению напряжения ΔU_2 .

Из сказанного следует, что при ручной дуговой сварке, когда изменения длины дуги наиболее часты, а при сварке в труднодоступных местах сварщику приходится самому искусственно изменять длину дуги, наиболее предпочтительно использовать источники питания с крутопадающей характеристикой, так как изменения тока при заданных режимах будут незначительны, а следовательно, и основные размеры шва будут меняться незначительно.

При механизированных способах сварки лучшие результаты достигаются при использовании источников с жесткими характеристиками благодаря более интенсивному саморегулированию дуги. Саморегулирование дуги — это свойство сварочной дуги при сварке плавящимся электродом восстанавливать длину дуги при случайных ее отклонениях благодаря изменению скорости плавления электрода. Чем больше изменяется длина дуги, тем больше изменяется ток и, следовательно, скорость плавления электрода. Если длина дуги уменьшается, ток и скорость плавления увеличиваются и длина дуги возвращается к первоначальному значению.

§ 27. Сварочные трансформаторы, выпрямители и генераторы

Сварочные трансформаторы. Это специальные понижающие трансформаторы, имеющие требуемую внешнюю характеристику, обеспечивающие питание сварочной дуги и регулирование сварочного тока. Трансформаторы, как правило, имеют падающую ха-

рактическую, их используют для ручной дуговой сварки и автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы с жесткой характеристикой применяют для электрошлаковой сварки.

Трансформатор имеет сердечник — магнитопровод из трансформаторной стали, на сердечнике размещаются две обмотки — первичная и вторичная. Переменный ток из сети, проходя через первичную обмотку трансформатора, намагничивает сердечник, создавая в нем переменный магнитный поток, который, пересекая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней переменный ток.

Напряжения индуцированного тока зависит от числа витков вторичной обмотки, чем меньше витков, тем напряжение индукти-

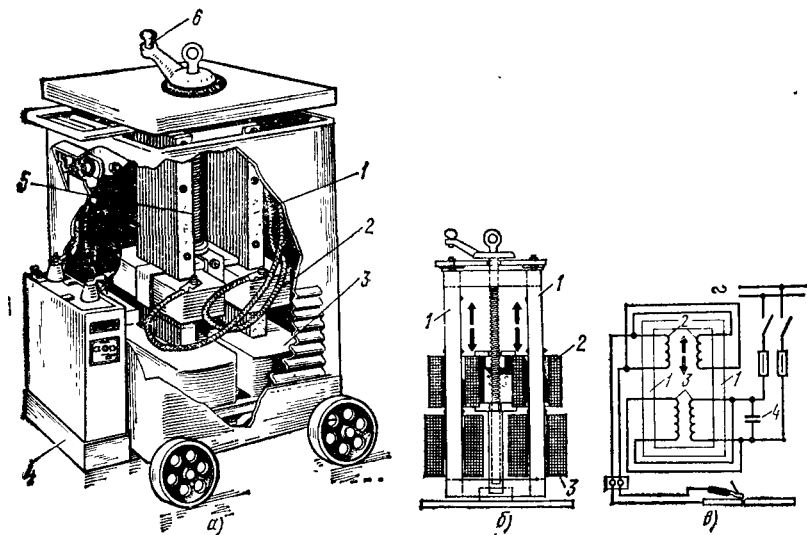


Рис. 30. Схема сварочного трансформатора ТСК-500:

а — внешний вид, б — схема регулирования сварочного тока, в — электрическая схема

руемого тока будет меньше и, наоборот, чем больше витков, тем напряжение выше. Регулирование величины сварочного тока и создание внешней характеристики обеспечивается изменением потока магнитного рассеяния или включением в сварочную цепь дополнительного индуктивного сопротивления.

В соответствии с этим сварочные трансформаторы подразделяют на две основные группы. К первой группе относят трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием. Трансформаторы этой группы можно разделить на три основных типа: трансформаторы с магнитными шунтами, подвижными катушками и витковым (ступенчатым) регулированием (трансформаторы типов ТС, ТД, СТЩ, ТСК, ТСП).

Ко второй группе относятся трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и дополнительной реактивной катушкой — дросселем (типов СТН, ТСД).

В качестве примера рассмотрим устройство трансформатора ТСК-500 (рис. 30) с повышенным магнитным рассеянием с подвижной катушкой, при перемещении которой регулируется сварочный ток. В нижней части сердечника 1 находится первичная обмотка 3, состоящая из двух катушек, расположенных на двух стержнях магнитопровода. Катушки первичной обмотки закреплены неподвижно.

Вторичная обмотка 2, также состоящая из двух катушек, расположена на значительном расстоянии от первичной. Катушки как первичной, так и вторичной обмоток соединены параллельно. Вторичная обмотка — подвижная и может перемещаться по сердечнику при помощи винта 5, с которым она связана, и рукоятки 6, находящейся на крышке кожуха трансформатора.

Сварочный ток регулируют изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками. При вращении рукоятки 6 по часовой стрелке вторичная обмотка приближается к первичной, маг-

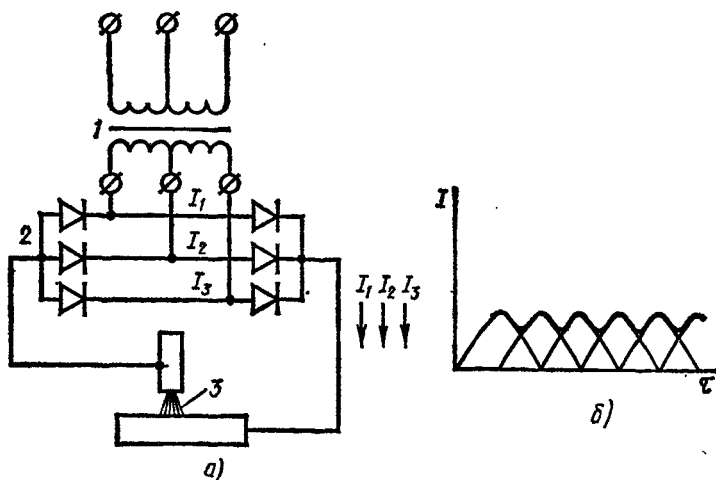


Рис. 31. Схема трехфазного выпрямителя:

а — схема включения, *б* — выпрямленный ток внешней цепи; 1 — понижающий трансформатор, 2 — блок селеновых или кремневых выпрямителей, 3 — сварочная дуга

нитный поток рассеяния и индуктивное сопротивление уменьшаются, сварочный ток возрастает. При вращении рукоятки против часовой стрелки вторичная обмотка удаляется от первичной, индуктивное сопротивление и магнитный поток рассеяния растут и сварочный ток уменьшается.

Пределы регулирования сварочного тока — 165—650 А. Последовательное соединение катушек первичной и вторичной обмоток позволяет получать малые сварочные токи с пределами регулирования 40—165 А.

Для приближенной установки силы сварочного тока на крышке

кожуха расположена шкала с делениями. Более точно ток устанавливают по амперметру.

Для повышения коэффициента мощности сварочный трансформатор ТСК-500 имеет в первичной цепи конденсатор 4 большой мощности.

Сварочные выпрямители. Это источники постоянного сварочного тока, состоящие из сварочного трансформатора с регулирующим устройством и блока полупроводниковых выпрямителей (рис. 31). Иногда в комплект сварочного выпрямителя входит еще дроссель, включаемый в цепь постоянного тока. Дроссель служит для получения падающей внешней характеристики. Действие сварочных выпрямителей основано на том, что полупроводниковые элементы проводят ток только в одном направлении. Наибольшее применение в сварочных выпрямителях получили селеновые и кремниевые полупроводники. Сварочные выпрямители выполняют в подавляющем большинстве случаев по трехфазной схеме, преимущества которой заключаются в большом числе пульсаций напряжения и более равномерной нагрузке трехфазной сети.

Сварочные выпрямители обладают рядом преимуществ перед преобразователями с вращающимися частями. Они имеют лучшие энергетические, динамические и весовые показатели, более высокий к. п. д., просты в обслуживании, более надежны из-за отсутствия вращающихся частей, при их работе отсутствует шум.

Сварочные выпрямители в зависимости от внешних характеристик можно разделить на три типа: с крутопадающими (ВСС-300-3, ВСС-120-4, ВКС-500 и др.), жесткими (или пологопадающими) характеристиками (ВС-200, ВС-300, ВС-600, ВС-1000, ИПП-120, ИПП-300, ИПП-500, ИПП-1000) и универсальные (ВСУ-300, ВСУ-500). Универсальные выпрямители обеспечивают возможность получения как жестких, так и падающих внешних характеристик, поэтому их можно применять для различных видов дуговой сварки. Цифра в марке выпрямителя означает номинальный ток при $PR = 60 \div 65\%$.

Сварочные генераторы. Это специальные генераторы постоянного тока, внешняя характеристика которых позволяет получать устойчивое горение дуги, что достигается изменением магнитного потока генератора в зависимости от сварочного тока. Сварочный генератор постоянного тока состоит из статора с магнитными полюсами и якоря с обмоткой и коллекторами. При работе генератора якорь вращается в магнитном поле, создаваемом полюсами статора. Обмотка якоря пересекает магнитные линии полюсов генератора, и поэтому в витках обмотки возникает переменный ток, который с помощью коллектора преобразуется в постоянный. Вращение якоря сварочного генератора обеспечивается в сварочных преобразователях электродвигателем, а в сварочных агрегатах — двигателем внутреннего сгорания. К коллектору прижаты угольные щетки, через которые постоянный ток подводится к клеммам. К этим клеммам присоединяют сварочные провода, идущие к электрододержателю и изделию.

Сварочные генераторы выполняют по различным электрическим схемам. Они могут быть с падающей характеристикой (генераторы типа ГСО в преобразователях типа ПСО-300, ПСО-500 и др.), с жесткой и пологопадающей характеристикой (типа ГСГ в преобразователях типа ПСГ-500) и универсальные (преобразователи типа ПСУ-300, ПСУ-500).

Наибольшее распространение получили сварочные генераторы с падающими внешними характеристиками, работающие по следующим схемам:

с независимым возбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой;

с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой.

Схема генератора с независимым возбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой показана на рис. 32, а.

Генератор имеет обмотку независимого возбуждения HO , питаемую от отдельного источника постоянного тока и последовательную размагничивающую обмотку PO , включенную в сварочную цепь последовательно с обмоткой якоря. Ток в цепи независимого возбуждения регулируется реостатом P . Магнитный поток Φ_H , создаваемый обмоткой независимого возбуждения HO , противоположен по своему направлению магнитному потоку Φ_P , создаваемому размагничивающей обмоткой PO . Результирующий поток представляет разность потоков $\Phi_{рез} = \Phi_H - \Phi_P$.

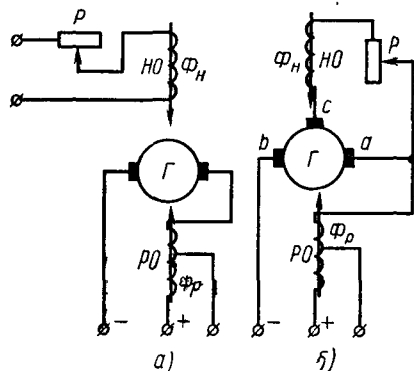


Рис. 32. Принципиальная схема сварочного генератора:

а — с независимым возбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой, б — с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой; Г — генератор, P — реостат, HO — намагничивающая обмотка, PO — размагничивающая обмотка

С увеличением тока в сварочной цепи будет увеличиваться Φ_P , а Φ_H остается неизменным, результирующий поток $\Phi_{рез}$, э. д. с. и напряжение на зажимах генератора будут падать, создавая падающую внешнюю характеристику генератора. Сварочный ток в генераторах этой системы регулируется реостатом P и секционированием последовательной обмотки, т. е. изменением числа ампер-витков.

В генераторах с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой возбуждения (рис. 32, б) используется принцип самовозбуждения. Напряжение на намагничивающую обмотку возбуждения HO снимается со щеток a и c самого генератора, это напряжение почти постоянно по величине, поэтому магнитный поток Φ_H практически не меняется.

§ 28. Установки для механизированной дуговой сварки

Устройство, состоящее из источника питания, сварочного аппарата или машины для сварки и механизированного вспомогательного оборудования, называется сварочной установкой (рис. 33).

Сварочный аппарат представляет собой конструктивное объединение сварочной головки с механизмом ее перемещения вдоль шва, механизмами установочных перемещений, устройством для подачи

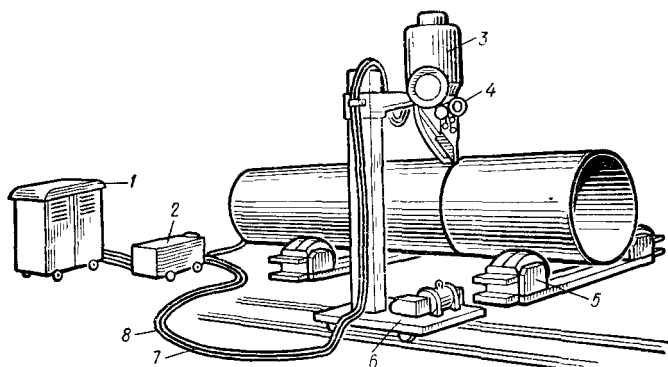


Рис. 33. Схема установки для выполнения автоматической сварки под флюсом продольных и кольцевых швов:

1 — источник питания, 2 — шкаф управления, 3 — флюсовая аппаратура, 4 — сварочный автомат, 5 — приспособление для трещины изделия, 6 — устройство для крепления и перемещения сварочного автомата, 7 — провода управления, 8 — провода для подвода сварочного тока

флюса или защитного газа, катушками или кассетами для проволоки, пультами управления и другими устройствами. Если сварочный аппарат перемещается в процессе сварки механизированным способом относительно изделия, то он называется **сварочным автоматом**.

Сварочная головка — это электромеханическое устройство, осуществляющее подачу в зону дуги плавящегося электрода, подвод к нему сварочного тока, поддержание устойчивого дугового процесса, а также прекращение процесса сварки. Сварочная головка может перемещаться по специальному пути, обычно по направляющим рельсам, или непосредственно по изделию. Если в конструкции сварочной головки предусмотрен механизм для ее перемещения над свариваемым изделием, головка называется **самоходной**. Сварочная головка, неподвижно закрепленная на стенде над свариваемым изделием называется **подвесной**. В подвесных головках отсутствует механизм перемещения самой головки, обычно относительно дуги перемещается изделие с помощью вспомогательного механизма, или стенда, на котором неподвижно закреплена головка.

Переносной сварочный аппарат (автомат) для дуговой сварки с самоходной тележкой, которая перемещает его вдоль свариваемых кромок по поверхности изделия или по переносному пути, уложенному на изделие, называется сварочным трактором.

Сварочный полуавтомат представляет собой сварочный аппарат с механизированной подачей сварочной проволоки, но перемещаемый в процессе сварки вручную (рис. 34).

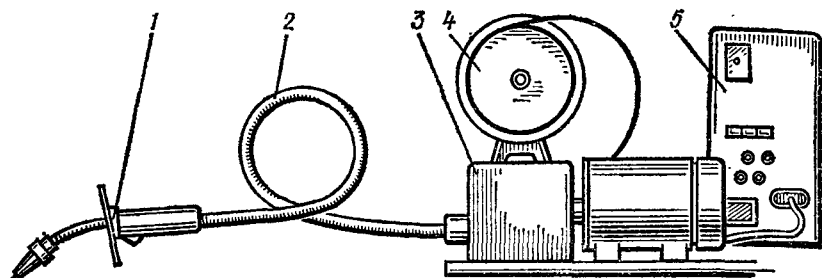


Рис. 34. Полуавтомат для дуговой сварки:
1 — горелка, 2 — гибкий шланг, 3 — подающий механизм, 4 — кассета с проволокой, 5 — шкаф управления

Полуавтоматы подразделяют на стационарные, где все части аппарата смонтированы в одном корпусе с источником питания; передвижные, где механизм подачи и катушка с проволокой размещены на тележке; переносные с максимальным облегчением механизма подачи и катушки с проволокой; ранцевые — с размещением механизма подачи с катушкой за спиной сварщика для сварки в монтажных условиях; специализированные.

По принципу подачи сварочной проволоки в зону сварки сварочные аппараты можно разделить на две группы:

автоматы и полуавтоматы с постоянной скоростью подачи, в которых заложен принцип саморегулирования;

автоматы и полуавтоматы с регулируемой скоростью подачи сварочной проволоки, в которых кроме саморегулирования используют автоматические регуляторы для поддержания неизменной длины дуги.

Основные преимущества механизированной сварки по сравнению с ручной — повышение производительности, улучшение качества шва, облегчение труда сварщика.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит устойчивость горения сварочной дуги?
2. Что такое внешняя характеристика источника питания?
3. Что такое вольт-амперная характеристика дуги?
4. Какие требования предъявляют к сварочным источникам питания?
5. Объясните устройство сварочного трансформатора, выпрямителя, генератора.
6. Что включает в себя сварочные установки для автоматической и полуавтоматической сварки?

§ 29. Сущность способа, оборудование, принадлежности, инструмент

Наибольший объем среди других видов сварки занимает ручная дуговая сварка плавящимся электродом. Сварку выполняют электродами, которые вручную подают в зону горения дуги и перемещают вдоль свариваемого изделия. Схема процесса сварки металлическим покрытым электродом показана на рис. 35. Дуга горит между стержнем электрода 1 и основным металлом 7. Под действием тепла дуги электрод и основной металл плавятся, образуя металлическую сварочную ванну 4. Капли жидкого металла 8 с расплавляемого электрода переходят в ванну через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода 2, образуя газовую защиту 3 вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну на поверхности расплавленного металла.

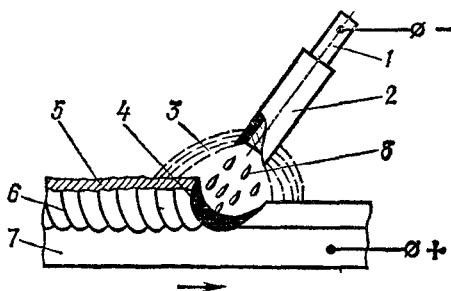


Рис. 35. Ручная дуговая сварка металлическим электродом с покрытием (стрелкой указано направление сварки)

Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют сварочную ванну. По мере движения дуги сварочная ванна затвердевает и образуется сварной шов 6. Жидкий шлак по мере остывания образует на поверхности шва твердую шлаковую корку 5, которая удаляется

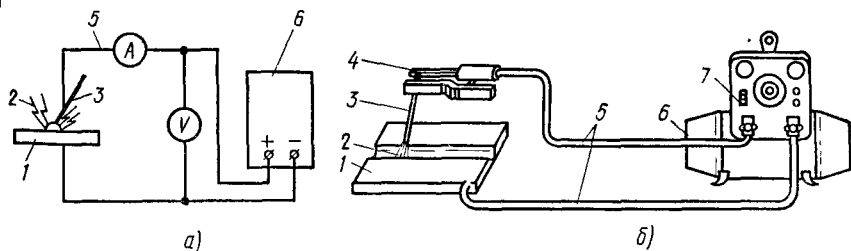


Рис. 36. Схема питания дуги при ручной дуговой сварке (на постоянном токе): а — электрическая схема, б — общая компоновка поста для сварки; 1 — изделие, 2 — сварочная дуга, 3 — электрод, 4 — электрододержатель, 5 — сварочные провода, 6 — источник питания, 7 — щит с приборами контроля и регулирования параметров режима сварки

после остывания шва. Для обеспечения заданного состава и свойств шва сварку выполняют покрытыми электродами, к которым предъявляют специальные требования (см. § 23).

Рабочим местом для ручной сварки служит сварочный пост, оснащенный источником питания, токоподводом, необходимыми инструментами, принадлежностями и приспособлениями. Схема питания дуги приведена на рис. 36.

Сварочные посты могут быть стационарными и передвижными. К с т а ц и о н а р н ы м постам относятся посты, расположенные в цехе, преимущественно в отдельных сварочных кабинках, в которых сваривают изделия небольших размеров. П е р е д в и ж н ы е сварочные посты, как правило, применяют при монтаже крупногабаритных изделий (трубопроводы, металлоконструкции, сосуды) и ремонтных работах. При этом часто используют переносные источники питания.

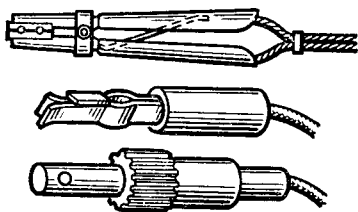


Рис. 37. Электрододержатели для ручной дуговой сварки

который предназначен для зажима электрода и подвода сварочного тока. Применяют электрододержатели пружинного и пластинчатого типов (рис. 37).

Согласно ГОСТ 14651—78, электрододержатели выпускают трех типов в зависимости от силы сварочного тока: I типа — для тока 125 А; II — 125—315 А, III — 315—500 А.

Для подвода тока от источника питания к электрододержателю и изделию используют сварочные провода. Сечения проводов выбирают по установленным нормативам для электротехнических установок — 5—7 А/мм².

Для предохранения лица и глаз сварщика от лучей электрической дуги служат специальные защитные приспособления — щитки и маски из жаростойких диэлектриков (фибры, пропитанной специальным раствором фанеры и т. п.) с защитными стеклами — светофильтрами (размер 52×102 мм). Для предохранения тела применяют спецодежду из плотного брезента или сукна, иногда из асбестовой ткани.

К вспомогательным инструментам для ручной сварки относятся стальные проволочные щетки для зачистки кромок перед сваркой и для удаления с поверхности швов остатков шлака, молоток-шлакоотделитель для удаления шлаковой корки, особенно с угловых и корневых швов в глубокой разделке, зубило, набор шаблонов для проверки размеров швов, стальное клеймо для клеймения швов, выполненных сварщиком, метр, стальная линейка, отвес, угольник, чертилка, мел, а также ящик для хранения и переноски инструмента.

§ 30. Техника ручной дуговой сварки

Выбор режима ручной дуговой сварки. Под режимом сварки понимают совокупность контролируемых параметров, определяющих условия сварки. Параметры режима сварки подразделяют на

основные и дополнительные. К основным параметрам режима ручной сварки относят диаметр электрода, величину, род и полярность тока, напряжение на дуге, скорость сварки, число проходов. К дополнительным относят величину вылета электрода, состав и толщину покрытий электрода, положение электрода и положение изделия при сварке.

Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины металла, катета шва, положения шва в пространстве.

Примерное соотношение между толщиной металла S и диаметром электрода $d_э$ при сварке в нижнем положении шва составляет:

S , мм	1—2	3—5	4—10	12—24	30—60
$d_э$, мм	2—3	3—4	4—5	5—6	6—8

Сила тока в основном зависит от диаметра электрода, но также от длины его рабочей части, состава покрытия, положения сварки. Чем больше ток, тем больше производительность, т. е. больше количество наплавляемого металла: $G = \alpha_n I_{св} \cdot t$, где G — количество наплавленного металла, г, α_n — коэффициент наплавки, г/(А·ч), $I_{св}$ — сварочный ток, А, t — время, ч.

Однако при чрезмерном токе для данного диаметра электрода электрод быстро перегревается выше допустимого предела, что приводит к снижению качества шва и повышенному разбрызгиванию. При недостаточном токе дуга неустойчива, часто обрывается, в шве могут быть непровары.

Величину тока можно определить по следующим формулам: при сварке конструкционных сталей для электродов диаметром 3—6 мм $I_{св} = (20 + 6d_э)d_э$;

для электрода диаметром менее 3 мм $I_{св} = 30d_э$, где $d_э$ — диаметр электрода, мм.

Сварку швов в вертикальном и потолочном положениях выполняют, как правило, электродами диаметром не более 4 мм. При этом сила тока должна быть на 10—20% ниже, чем для сварки в нижнем положении.

Напряжение дуги изменяется в сравнительно узких пределах 16—30 В.

Техника сварки. Дуга может возбуждаться двумя приемами: касанием впритык и отводом перпендикулярно вверх или «чирканием» электродом, как спичкой. Второй способ удобнее, но неприемлем в узких и неудобных местах.

В процессе сварки необходимо поддерживать определенную длину дуги, которая зависит от марки и диаметра электрода. Ориентировочная нормальная длина дуги должна быть в пределах $l = (0,5 \div 1,1)d_э$, где l — длина дуги, мм, $d_э$ — диаметр электрода, мм.

Длина дуги оказывает существенное влияние на качество сварного шва и его геометрическую форму. Длинная дуга способствует более интенсивному окислению и азотированию расплавляемого металла, увеличивает разбрызгивание, а при сварке электродами основного типа приводит к пористости металла.

В процессе сварки электроду сообщается движение в трех направлениях.

Первое движение — поступательное, по направлению оси электрода. Этим движением поддерживается постоянная, в известных пределах, длина дуги в зависимости от скорости плавления электрода.

Второе движение — перемещение электрода вдоль оси валика для образования шва. Скорость этого движения устанавливается в зависимости от тока, диаметра электрода, скорости его плавления, вида шва и других факторов.

При отсутствии поперечных движений электрода получается так называемый ниточный валик на 2—3 мм больший диаметра электрода или узкий шов шириной $b \leq 1,5d_0$.

Третье движение — перемещение электрода поперек шва для получения шва шире, чем ниточный валик, так называемого уширенного валика.

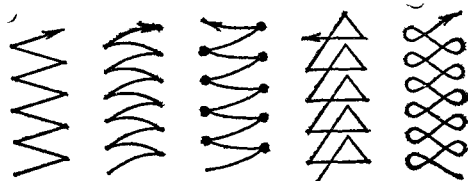


Рис. 38. Траектория движения конца электрода при ручной дуговой сварке

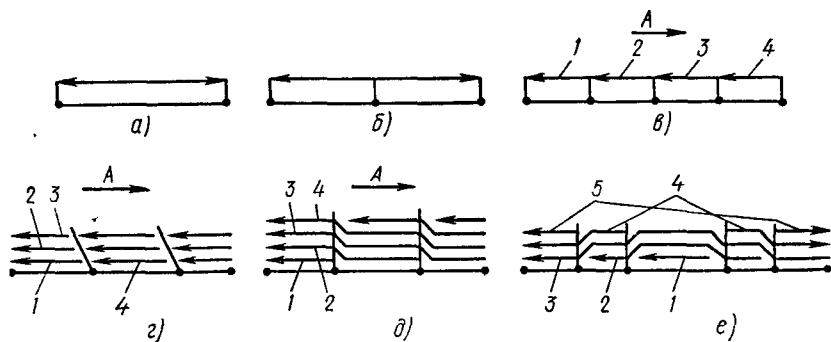


Рис. 39. Схемы сварки:

a — напроход, *b* — от середины к краям, *в* — обратноступенчатый способ, *г* — блоками, *д* — каскадом, *е* — горкон, *A* — направление заполнения разделки; стрелками указано направление сварки, 1—5 — последовательность сварки в каждом слое

Поперечные колебательные движения конца электрода определяются формой разделки, размерами и положением шва, свойствами свариваемого материала, навыком сварщика (рис. 38). Для широких швов, получаемых с поперечными колебаниями $b = (1,5 \div 5)d_0$.

Для повышения работоспособности сварных конструкций, уменьшения внутренних напряжений и деформаций большое значение имеет порядок заполнения швов.

Под порядком заполнения шва понимают как порядок запол-

нения разделки шва по поперечному сечению, так и последовательность сварки по длине шва.

По протяженности все швы условно можно разделить на три группы: короткие — до 300 мм, средние — 300—1000 мм, длинные >1000 мм.

В зависимости от протяженности шва, материала, требований к точности и качеству сварных соединений сварка таких швов может выполняться различно (рис. 39).

Короткие швы сваривают на проход — от начала шва до его конца. Швы средней длины варят от середины к концам или обратно-ступенчатым методом.

Швы большой длины варят двумя способами: от середины к краям — обратноступенчатым способом и вразброс.

При обратноступенчатом методе весь шов разбивается на небольшие участки длиной по 150—200 мм, на каждом участке сварку ведут в направлении, обратном общему направлению сварки. Длина участков обычно равна от 100 до 350 мм.

В зависимости от количества проходов (слоев), необходимых для выполнения проектного сечения шва, различают однопроходный (однослойный) и многопроходный (многослойный) швы (рис. 40).

С точки зрения производительности наиболее целесообразными являются однопроходные швы, которые обычно применяют при сварке металла небольших толщин (до 8—10 мм) с предварительной разделкой кромок.

Сварку соединений ответственных конструкций большой толщины (свыше 20—25 мм), когда появляются объемные напряжения и возрастает опасность образования трещин, выполняют с применением специальных приемов заполнения швов «горкой» или «каскадным» методом.

При сварке «горкой» (см. рис. 39) сначала в разделку кромок наплавливают первый слой небольшой длины 200—300 мм, затем — второй слой, перекрывающий первый и имеющий примерно в два раза большую длину. Третий слой перекрывает второй и длиннее его на 200—300 мм. Так наплавливают слои до тех пор, пока на небольшом участке над первым слоем разделка не будет заполнена. Затем от этой «горки» сварку ведут в разные стороны короткими швами тем же способом. Таким образом, зона сварки все время находится в горячем состоянии, что предупреждает появление трещин. «Каскадный» метод является разновидностью горки. Соединения под сварку собирают в приспособлениях, чаще всего с прихватками. Сечение прихваточного шва составляет примерно $\frac{1}{3}$ от се-

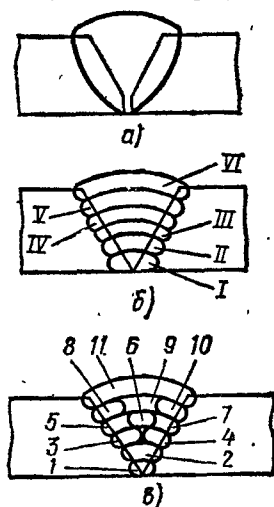


Рис. 40. Поперечные сечения стыковых швов: а — однопроходных (однослойных), б — многослойных, в — многопроходных; I — VI — слои, I—II — проходы

чения основного шва, длина его 30—50 мм. Угловые швы сваривают «в угол» или «в лодочку» (рис. 41). При сварке «в угол» проще сборка, допускается большой зазор между свариваемыми деталями (до 3 мм), но сложнее техника сварки, возможны дефекты типа подрезов и наплывов, меньше производительность, так как приходится

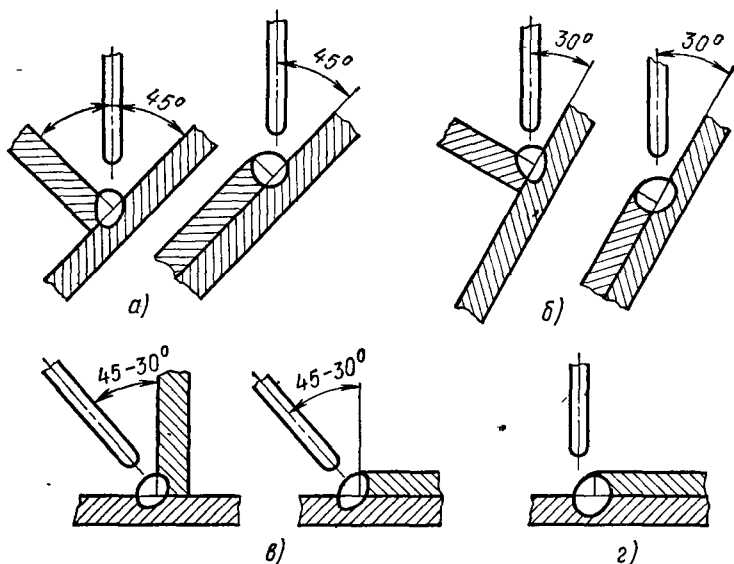


Рис. 41. Положение электрода и изделия при выполнении угловых швов:

а — сварка в симметричную «лодочку», *б* — в несимметричную «лодочку», *в* — «в угол» наклонным электродом, *г* — с оплавлением кромок

за один проход сваривать швы небольшого сечения (катет ≤ 8 мм) и применять многослойную сварку. Сварка «в лодочку» более производительна, допускает большие катеты шва за один проход, но требует более тщательной сборки.

§ 31. Повышение производительности ручной дуговой сварки

Производительность сварки определяется количеством расплавленного металла в единицу времени, а основное время сварки — по формуле

$$t_0 = \frac{G_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} I_{\text{св}}} = \frac{F_{\text{н}} \gamma l}{\alpha_{\text{н}} I_{\text{св}}}$$

Из формулы следует, что для уменьшения основного времени t_0 необходимо стремиться, с одной стороны, к увеличению сварочного тока $I_{\text{св}}$ и коэффициента наплавки $\alpha_{\text{н}}$, с другой — к уменьшению поперечного сечения наплавленного металла $F_{\text{н}}$.

Увеличение тока и объема расплавленного металла достигают применением электродов больших диаметров (6—10 мм), сваркой

пучком электродов, сваркой специальными спаренными электродами при использовании трехфазной дуги.

Во всех этих случаях увеличение тока достигается увеличением суммарной площади поперечного сечения электродных стержней. Следует иметь в виду, что увеличение массы электрода и электрододержателя увеличивает утомляемость сварщика. Появляются трудности с обеспечением провара в узких разделках кромок и угловых швов. Эти способы целесообразно использовать при заварке дефектов литья, заполнении разделок толстолистового металла.

Повышение производительности за счет увеличения коэффициента наплавки α_n достигается применением электродов с большим α_n и электродов, содержащих железный порошок в покрытии. Электроды с железным порошком содержат в покрытии до 50—60% порошка (например, ОЗС-6), поэтому образование сварного шва происходит за счет расплавления стержня и порошка покрытия. При этом коэффициент наплавки увеличивается до 12—18 г/(А·ч) и производительность — в 1,5—2 раза.

Уменьшение площади сечения наплавленного металла F_n при заданной толщине свариваемого металла достигается соответствующей разделкой кромок, например применением двустороннего скоса кромок вместо одностороннего. Уменьшение F_n за счет увеличения глубины и площади проплавления достигается сваркой методом опирания (с глубоким проваром, погруженной дугой). Сущность способа заключается в том, что электрод опирают с легким нажимом покрытия о свариваемый металл под углом 15—20° к вертикали, перемещают углом назад по линии наложения валика без поперечных колебаний. Используют электроды с повышенной толщиной покрытия. Силу сварочного тока увеличивают на 20—40% и выбирают по формуле $I_{св} = (60 + 70)d_э$. Увеличенная мощность сварочной дуги, концентрированный ввод тепла, быстрое перемещение электрода под углом и интенсивное вытеснение расплавленного металла сварочной ванны из-под дуги давлением дуги создают условия для глубокого провара при минимальном разбрызгивании. Этот метод используют при сварке в нижнем положении стыковых швов и угловых «в лодочку».

Повышение производительности достигается применением сварки наклонным и лежащим электродом за счет того, что один рабочий может одновременно обслуживать 3—4 поста.

Контрольные вопросы

1. Что входит в пост для ручной дуговой сварки?
2. Как выбирают режимы ручной дуговой сварки?
3. Какие основные движения электродом производят при ручной сварке?
4. Какой порядок применяют при заполнении разделки швов при ручной дуговой сварке?
5. Назовите основные способы повышения производительности ручной дуговой сварки.

§ 32. Сущность сварки под флюсом

Сварка под флюсом — дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса, обеспечивающего защиту сварочной ванны от воздуха.

По степени механизации процесса различают автоматическую и полуавтоматическую сварку под флюсом.

Схема процесса автоматической сварки под флюсом приведена на рис. 42. Электродная проволока автоматически подается в зону сварки. Дуга горит между концом электрода 4 и изделием 2 под

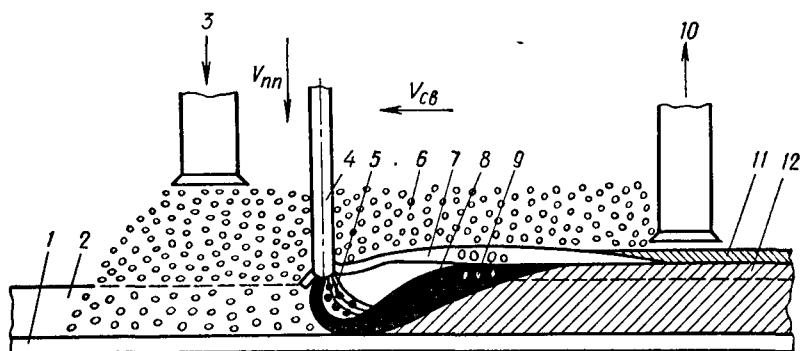


Рис. 42. Схема процесса автоматической сварки под флюсом

слоем сварочного флюса 6, подаваемого на изделие из бункера 3. Под действием тепла, выделяемого сварочной дугой, плавятся электродная проволока и основной металл, а также часть флюса, находящегося в зоне дуги. В области горения дуги образуется полость, ограниченная в верхней части оболочкой расплавленного флюса 7. Эта полость заполнена парами металла, флюса и газами, их давление поддерживает флюсовый свод, образующийся над сварочной ванной. Дуга 5 горит в непосредственной близости от переднего края ванны, несколько отклоняясь от вертикального положения в сторону, обратную направлению сварки. Под влиянием давления дуги жидкий металл также оттесняется в сторону, противоположную направлению сварки, образуя сварочную ванну 8. Под электродом создается кратер с тонким слоем расплавленного металла, а основная масса расплавленного металла занимает пространство от кратера до поверхности шва 12. Расплавленный флюс 7 вследствие значительно меньшей плотности всплывает на поверхность расплавленного металла шва и покрывает его плотным слоем.

Флюс защищает дугу и сварочную ванну от вредного воздействия окружающей среды, оказывает металлургическое воздействие на металл сварочной ванны и, кроме того, препятствует разбрызгиванию жидкого металла. Расплавленный флюс, обладая низкой

теплопроводностью, замедляет процесс охлаждения шва, что облегчает шлаковым включениям и растворенным в металле газам 9 подняться на поверхность ванны, способствуя очищению металла шва от загрязнений. Нерасплавленный в процессе сварки избыточный флюс пневматическим устройством 10 отсасывают со шва и используют в дальнейшем при последующей сварке. Расплавленная и затвердевшая часть флюса образует на шве толстую шлаковую корку 11. После прекращения сварки и охлаждения металла шлаковая корка легко отделяется от металла шва 12. Сварку обычно проводят на подкладке 1 или флюсовой подушке.

Преимуществами сварки под флюсом являются:

высокая производительность благодаря применению больших токов, большой глубины проплавления, а также почти полного отсутствия потерь металла на угар и разбрызгивание;

механизация процесса сварки;

высокое качество сварных швов за счет хорошей защиты флюсом сварочной ванны от воздуха;

улучшение условий труда сварщиков.

Недостатками сварки под флюсом являются возможность сварки только в нижнем положении (наклон до 15°), трудности применения в монтажных условиях, на коротких швах.

Сварку под флюсом применяют для углеродистых, низко- и высоколегированных сталей, а также цветных металлов и их сплавов.

§ 33. Оборудование для сварки под флюсом

Источники сварочного тока. Для сварки под флюсом применяют источники переменного и постоянного тока с пологопадающей характеристикой. Используют преимущественно источники переменного тока в связи с большей экономичностью и хорошей устойчивостью горения дуги под флюсом. Для этой цели серийно выпускают трансформаторы ТСД-500-1, ТСД-1000-4 и ТСД-2000 в однокорпусном исполнении, со встроенными дросселями, с дистанционным управлением.

При особо высоких требованиях к качеству шва, а также сварке изделий малой толщины применяют серийно выпускаемые преобразователи ПС-500, ПСО-500, ПС-1000, а также сварочные выпрямители ВС-500, ВС-1000-2, ВДУ-504, ВДУ-1001, ВДУ-1601.

Автоматы. Очень широкое применение находят сварочные автоматы тракторного типа для сварки на токах от 500 до 1600 А (АДС-1000-2, ТС-17М-У, ТС-35, АДФ-500 и др.).

Рассмотрим в качестве примера сварочный автомат тракторного типа ТС-35, предназначенный для дуговой сварки под флюсом стыковых соединений с разделкой и без разделки кромок, для сварки угловых швов вертикальным и наклонным электродом и для сварки нахлесточных соединений. Трактор в процессе сварки может передвигаться непосредственно по изделию или по направляющей линейке.

Сварочный автомат ТС-35 состоит из сварочного трактора (рис. 43), аппаратного ящика и источника питания. Трактор является самоходным механизмом, состоящим из сварочной головки и ходовой тележки с индивидуальными электроприводами. Механизм подачи 1 обеспечивает подачу электродной проволоки диаметром 1,6—5,0 мм при помощи наборных роликов с насечкой. Скорость подачи проволоки регулируется в пределах 50—500 м/ч. Ходовая

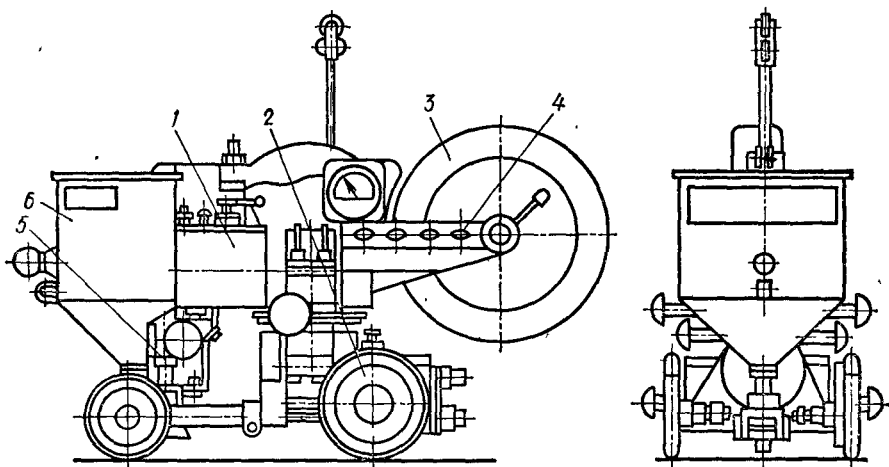


Рис. 43. Общий вид сварочного трактора ТС-35

тележка 2 служит для перемещения трактора вдоль свариваемого шва. Скорость сварки устанавливается подбором сменных шестерен в пределах 12—120 м/ч. На тележке установлена кассета 3 для электродной проволоки, пульт управления 4 и бункер для флюса 6.

Сварочная головка имеет два типа токоподводящих мундштуков 5. Для сварки электродной проволокой диаметром 3—5 мм на токах до 1000 А используют контактные ролики. Для сварки тонкой проволокой диаметром 1,6—2 мм на токах до 600 А применяют трубчатые мундштуки с наконечником в качестве скользящего контакта.

В тех случаях, когда в процессе сварки перемещается само изделие, а сварочная головка остается неподвижной, применяют подвесные сварочные головки. В качестве подвесных головок могут быть использованы головки автоматов АВС, АДС-1000-2, АДФ-500 и др., имеющие отдельный электропривод для подачи электродной проволоки.

При массовом производстве однотипных изделий (трубы, резервуары, балки) для повышения производительности повышают скорость сварки. Для обеспечения хорошего формирования шва при больших скоростях для сварки стыковых соединений под флюсом применяют многодуговую автоматическую сварку. При многодуговой сварке шов выполняют несколькими отдельными дугами, допускающими независимое регулирование и режимы, обычно электродные проволоки плавятся в одну общую ванну.

Наибольшее распространение получила двухдуговая и трехдуговая сварка, при которой стыковые соединения сваривают двумя или тремя дугами, расположенными вдоль шва. Сварку двумя дугами выполняют на скорости до 120—140 м/ч, производительность по сравнению с однодуговой сваркой увеличивается в 2,5—3 раза.

Автоматы для многодуговой сварки в большинстве случаев состоят из комплекта двух или трех одноэлектродных сварочных головок, в них обеспечивается одновременная подача соответствующего числа электродных проволок при раздельном питании (двухдуговой автомат ДТС-38; А-639). Двухдуговые автоматы позволяют применять схему трехфазного питания и осуществлять сварку трехфазной дугой.

Полуавтоматы. Применение автоматов для дуговой сварки под флюсом не всегда осуществимо и целесообразно. Сварку в труднодоступных местах, а также криволинейных и коротких швов можно выполнять шланговыми полуавтоматами. Сущность способа полуавтоматической сварки под флюсом заключается в том, что электродная проволока в зону сварки подается из кассеты, расположенной на 1,5—3 м от горелки (держателя), через специальный шланговый провод, который одновременно служит для подвода сварочного тока к электродной проволоке через мундштук горелки. Дуга вдоль свариваемых кромок перемещается вручную. Флюс в зону сварки поступает либо из небольшого бункера, укрепленного на горелке, либо по гибкому резиновому шлангу с помощью сжатого воздуха. Для подвода сварочного тока и направления электродной проволоки служит полый гибкий кабель, соединяющий сварочную горелку с механизмом подачи.

Характерной особенностью полуавтоматической сварки под флюсом является применение электродной проволоки диаметром 1,6—2 мм при высоких плотностях тока, что обеспечивает глубокое проплавление основного металла и сварку металла большой толщины.

Полуавтоматическую сварку под флюсом можно выполнять как на переменном, так и на постоянном токе. Однако при сварке стыковых соединений тонкого металла и угловых швов с малым катетом предпочтительнее использование постоянного тока обратной полярности.

§ 34. Технология сварки под флюсом

Параметры режима сварки под флюсом. Основными составляющими режима сварки под флюсом являются величина тока, его род и полярность, напряжение дуги, скорость сварки, диаметр электрода, скорость подачи электродной проволоки. Дополнительные параметры режима — вылет электрода, наклон электрода и изделия, марка флюса, подготовка кромок и вид сварного соединения.

Параметры режима сварки выбирают исходя из толщины свариваемого металла, требуемой формы сварного шва, которая определяется глубиной проплавления и шириной шва. Режим сварки определяют по экспериментальным таблицам или приближенно

простым расчетом, при сварке без разделки — по глубине проплавления, при сварке с разделкой — по количеству наплавляемого металла. Порядок подбора режима сварки следующий: в зависимости от толщины свариваемого металла выбирают диаметр электродной проволоки, затем в зависимости от диаметра устанавливают сварочный ток, далее скорость подачи электродной проволоки и скорость сварки.

Примерные режимы автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом на переменном токе низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм приведены в табл. 3.

3. Режимы сварки под флюсом

Вид сварки	Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
Автоматическая	10	5	700—750	34—36	30
Полуавтоматическая	10	2	450—500	36—40	20—25

Влияние изменения параметров режима сварки на глубину проплавления и ширину шва следующее. Увеличение тока в связи с увеличением тепловой мощности и давления дуги увеличивает глубину проплавления, но мало влияет на ширину шва. Увеличение диаметра электрода при неизменном токе приводит к уменьшению глубины проплавления и увеличению ширины шва в связи с блужданием дуги. Определенное влияние на размеры шва оказывают наклон электрода и изделия. При сварке углом вперед из-за подтекания металла в зону сварки уменьшается глубина проплавления и увеличивается ширина шва. При сварке углом назад в связи с оттеснением расплавленного металла давлением дуги в хвостовую часть ванны, глубина проплавления увеличивается, ширина шва уменьшается. Соответственно при сварке на спуск глубина проплавления уменьшается, ширина шва увеличивается, при сварке на подъем — соотношение обратное.

Техника сварки зависит от толщины металла и вида соединения.

Для удержания сварочной ванны применяют следующие технологические приемы: сварка на флюсовой подушке, флюсомедной подкладке, временных и остающихся стальных подкладках, керамических и асбестовых подкладках, по ручной подварке корня шва, на весу при зазоре менее 1 мм.

Основное положение при сварке угловых швов — «в лодочку» (симметричную и несимметричную). Это положение обеспечивает технологические удобства, хорошее формирование и высокое качество шва, но требует дополнительных мер для удержания сварочной ванны от вытекания (подварка, асбестовые подкладки, флюсомедные подкладки) или зазор — менее 1,5 мм.

Сварку «в угол» выполняют наклонным электродом. При этом способе имеются трудности по направлению электрода, особенно при многопроходной сварке. Максимальный катет шва при одном проходе составляет 8 мм, но при этом способе меньшие требования к качеству сборки, допускается зазор до 3 мм.

§ 35. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка — сварка плавлением, при которой для нагрева металла используется тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через расплавленный электропроводный шлак.

По ГОСТ 19521—74 электрошлаковая сварка классифицируется: по виду электрода — проволочным электродом, пластинчатым электродом, плавящимся мундштуком;

количеству электродов с общим подводом сварочного тока — одно-, двух- и многоэлектродная;

наличию колебаний электрода — без колебаний и с колебаниями.

Схема электрошлаковой сварки проволочным электродом показана на рис. 44. Электрод 1 и основной металл 2 связаны электрически через расплавленный шлак 3. За счет тепла, выделяемого в шлаковой ванне при прохождении электрического тока, металл электрода и кромки основного металла оплавляются и стекают на дно расплава, образуя металлическую ванну 4. В начале процесса сварки возбуждается электрическая дуга, после расплавления флюса и образования шлаковой ванны жидкий флюс заливает и гасит дугу и дуговой процесс переходит в электрошлаковый.

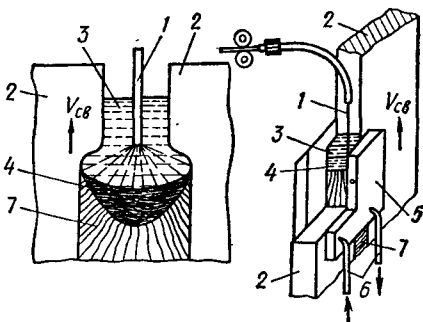


Рис. 44. Схема процесса электрошлаковой сварки

Свариваемые детали собирают вертикально без скоса кромок, с зазором 20—40 мм. Для формирования шва и удержания жидкого металла и шлака от вытекания применяют специальные формирующие устройства — подвижные или неподвижные медные ползуны 5, охлаждаемые водой 6, или остающиеся пластины. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны расплавленный металл образует шов 7.

К основным параметрам электрошлаковой сварки относятся: скорость сварки, сварочный ток, скорость подачи электродов, напряжение сварки, толщина металла, приходящегося на один электрод, расстояние между электродами. Вспомогательные составляющие режима: зазор между кромками, глубина шлаковой ванны, состав

флюса, скорость поперечных колебаний электрода, вылет электрода, сечение проволоки и др. При использовании электродных проволок глубина шлаковой ванны обычно 25—70 мм, скорость подачи проволоки 100—500 м/ч.

Сварку пластинчатым электродом применяют для сравнительно коротких швов высотой до 1,5 м. Вместо пластин можно применять расходоуемые электроды, т. е. стержни круглого, квадратного и других сечений. В этом случае значительно упрощается аппаратура для сварки.

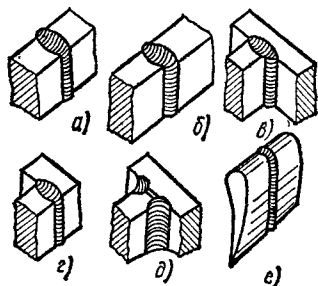


Рис. 45. Основные виды сварных соединений, выполняемых электрошлаковой сваркой:

а, б — стыковые, в, д — тавровые, е — угловые, е — переменного сечения

Сварка плавящимся мундштуком как бы объединяет способы сварки проволочными и пластинчатыми электродами. В пластинчатом электроде делают пазы или к нему приваривают трубки для подачи электродных проволок. При сварке пластина остается неподвижной и является плавящимся мундштуком, по которому подается проволока. Этим способом можно сваривать швы сложного криволинейного профиля.

Электрошлаковую сварку осуществляют специальными электрошлаковыми аппаратами, которые обеспечивают подачу в зону сварки электрода, поддержа-

ние устойчивого электрошлакового процесса и перемещение вдоль шва по мере его образования.

Электрошлаковая сварка имеет следующие особенности и преимущества:

металл практически любой толщины можно сваривать за один проход, поэтому производительность сварки в 5—15 раз выше, чем при многослойной автоматической сварке под флюсом, при этом (как правило) не требуется разделки кромок;

вертикальное положение металлической ванны, повышенная температура ее верхней части и значительное время нахождения металла в расплавленном состоянии способствуют удалению газов и неметаллических включений из металла шва;

малый расход флюса, обычно не более 5% от массы наплавленного металла.

Недостатком электрошлаковой сварки является значительный перегрев металла околошовной зоны, что приводит к снижению пластических свойств, поэтому требуется (как правило) последующая высокотемпературная обработка для получения требуемых механических свойств сварного соединения.

Электрошлаковую сварку применяют для сварки сталей, алюминиевых и титановых сплавов толщиной более 25 мм. Основные виды сварных соединений, выполняемых электрошлаковой сваркой, показаны на рис. 45.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сварки под флюсом?
2. Какие источники питания используют при сварке под флюсом?
3. Из каких узлов состоит автомат для сварки под флюсом?
4. Назовите параметры режима сварки под флюсом.
5. Как выполняют сварку под флюсом стыковых и угловых соединений?
6. В чем заключается сущность электрошлаковой сварки?

Глава 10. СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

§ 36. Общие сведения

Сущностью и отличительной особенностью дуговой сварки в защитных газах является защита расплавленного и нагретого до высокой температуры основного и электродного металла от вредного влияния воздуха защитными газами, которые обеспечивают физическую изоляцию металла и зоны сварки от воздуха и заданную атмосферу в зоне сварки.

Преимуществами сварки в защитных газах являются:

высокая производительность (приблизительно в 2,5 раза выше, чем при ручной дуговой сварке покрытыми электродами);

простота механизации и автоматизации;

возможность сварки в различных пространственных положениях;

малая зона термического влияния и относительно небольшие деформации изделий в связи с высокой степенью концентрации дуги;

высокое качество защиты, отсутствие необходимости применения зачистки швов при многослойной сварке;

доступность наблюдения за процессом сварки;

возможность сварки металла различной толщины (от десятых долей миллиметра до десятков миллиметров).

Разновидности сварки в защитных газах можно квалифицировать по следующим признакам:

типу электрода — неплавящимся и плавящимся электродом;

типу защитного газа — инертные, активные, их смеси;

способу защиты — струйная, в контролируемой атмосфере;

характеру горения дуги — стационарной, импульсной;

механизации — ручная, полуавтоматическая, автоматическая.

По способу защиты различают местную и общую защиту свариваемого узла (сварку в контролируемой атмосфере). Основным способом местной защиты является струйная защита шва. При этом способе защитная среда в зоне сварки создается газовым потоком центральной, боковой или комбинированной подачи газа (рис. 46). При центральной подаче газа дуга (рис. 46, а), горящая между электродом и основным металлом, со всех сторон окружена газом, подаваемым под небольшим избыточным давлением из сопла горелки, расположенного концентрично оси электрода. Этот способ защиты является наиболее распространенным. Боковую подачу газа применяют ограниченно. В ряде случаев с целью экономии инерт-

ных газов, а также получения оптимальных технологических и металлургических свойств защитной среды применяют горелки, конструкция которых обеспечивает комбинированную защиту двумя concentрическими потоками газов. Например, внутренний поток образуется аргоном, а внешний — углекислым газом. При

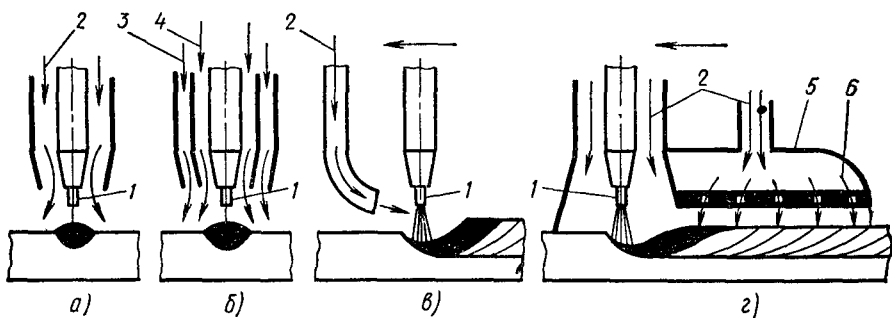


Рис. 46. Подача защитных газов в зону сварки:

а — центральная одним concentрическим потоком, *б* — центральная двумя concentрическими потоками, *в* — боковая, *г* — в подвижную камеру (насадку); 1 — электрод, 2 — защитный газ, 3, 4 — наружный и внутренний потоки защитных газов, 5 — насадка, 6 — распределительная сетка

сварке высокоактивных металлов (титан, цирконий, тантал, ниобий, молибден, вольфрам) необходимо защищать не только расплавленный металл, но и зону металла, нагреваемую при сварке до температуры более 300°C с лицевой и обратной стороны шва. Для расширения струйной защиты с лицевой стороны шва применяют дополнительные колпаки-приставки, надеваемые на сопло горелки.

Наиболее эффективная защита металла шва и зоны термического влияния обеспечивается при сварке в камерах с контролируемой атмосферой. Камеры предварительно продувают или вакуумируют, а затем заполняют защитным (инертным) газом заданного состава под небольшим давлением.

§ 37. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом

Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом — дуговая сварка, осуществляемая с использованием вольфрамового электрода и внешней защиты аргоном, вдуваемым в зону сварки. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом может быть ручной и автоматической. Сварка возможна без подачи и с подачей присадочной проволоки. Этот процесс предназначен главным образом для металлов толщиной менее 3—4 мм. Большинство металлов сваривают на постоянном токе прямой полярности. Сварку алюминия, магния и бериллия ведут на переменном токе.

При прямой полярности (плюс на изделии, минус на электроде) лучше условия термоэлектронной эмиссии, выше стойкость вольфрамового электрода и допускаемый предельный ток. Допус-

каемый ток при использовании вольфрамового электрода диаметром 3 мм составляет ориентировочно при прямой полярности — 140—280 А, обратной — только 20—40 А, при переменном токе — промежуточное значение 100—160 А. Дуга на прямой полярности легко зажигается и горит устойчиво при напряжении 10—15 В в широком диапазоне плотностей тока.

При обратной полярности возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость ее горения, резко уменьшается стойкость электрода, повышается его нагрев и расход. Эти особенности дуги

обратной полярности делают ее непригодной для непосредственного применения в сварочном процессе. Однако дуга обратной полярности

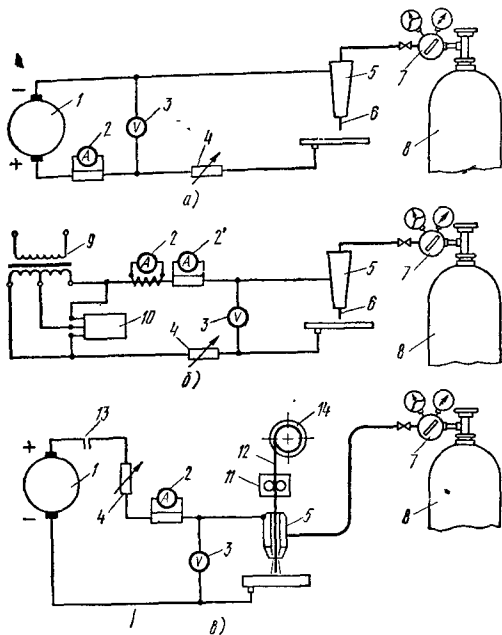


Рис. 47. Электрическая и газовая схемы сварки в защитных газах:

a — неплавящимся электродом в инертных газах на постоянном токе прямой полярности, *б* — то же, на переменном токе, *в* — плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности. 1 — сварочный преобразователь, 2 — амперметр, 3 — вольтметр, 4 — балластный резистор, 5 — горелка, 6 — вольфрамовый электрод, 7 — редуктор-расходомер для защитного газа, 8 — баллон с защитным газом, 9 — сварочный трансформатор, 10 — осциллятор, 11 — механизм подачи проволоки, 12 — плавящаяся сварочная проволока, 13 — контр-электрод, 14 — катушка с проволокой

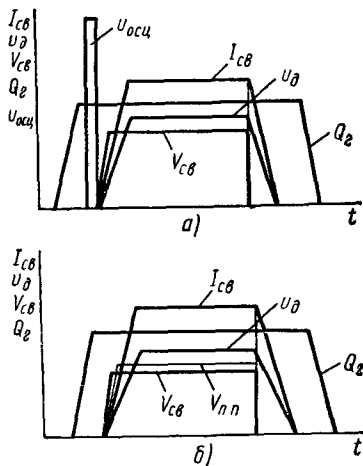


Рис. 48. Циклограмма процесса сварки в защитных газах:

a — неплавящимся вольфрамовым электродом, *б* — плавящимся электродом; $I_{св}$ — сварочный ток, $U_{д}$ — напряжение дуги, $V_{св}$ — скорость сварки, $Q_{г}$ — расход защитного газа, $V_{п,п}$ — подача сварочной проволоки, $U_{осц}$ — напряжение осциллятора

обладает важным технологическим свойством: при ее действии с поверхности свариваемого металла удаляются окислы и загрязнения. Это явление объясняется тем, что при обратной полярности поверхность металла бомбардируется тяжелыми положительными ионами аргона, которые, перемещаясь под действием электрического поля от плюса (электрод) к минусу (изделие), разрушают окисные

пленки на свариваемом металле, а выходящие с катода (поверхности изделия) электроны способствуют удалению разрушенных окисных пленок. Этот процесс удаления окислов называется *катодным распылением*. Указанное свойство дуги обратной полярности используют при сварке алюминия, магния, бериллия и их сплавов, имеющих прочные окисные пленки. Но так как при постоянном токе обратной полярности стойкость вольфрамового электрода низка, то для этой цели используют переменный ток. При этом удаление пленки, т. е. катодное распыление, происходит, когда свариваемое изделие является катодом. Таким образом при сварке неплавящимся электродом на переменном токе в определенной степени реализуются преимущества дуги прямой и обратной полярности, т. е. при этом обеспечивается и устойчивость электрода и разрушение окисных пленок.

Простейшие электрические и газовые схемы для аргонодуговой сварки приведены на рис. 47.

Технология аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом. На рис. 48 дана характерная циклограмма процесса аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом. На циклограмме показано изменение основных параметров процесса ручной сварки: сварочного тока $I_{св}$, напряжения дуги U_d , скорости подачи присадочной проволоки $V_{п.п.}$, скорости сварки $V_{св}$, расхода аргона Q_{Ar} и дополнительного параметра — напряжения осциллятора $U_{осц}$ в течение цикла сварки t . Газ подают за 10—15 с до начала горения дуги, давление газа составляет $(1,1—1,3) \cdot 10^5$ Па, средний расход газа для защиты зоны сварки — 10—15 л/мин, для обратной стороны шва — 30—50% от основного расхода.

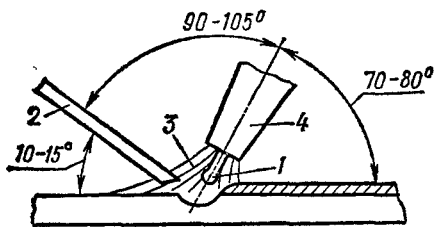


Рис. 49. Расположение горелки и присадочного прутка при ручной аргонодуговой сварке:

1 — электрод, 2 — присадочный пруток, 3 — защитный газ, 4 — сопло горелки

Дуга возбуждается замыканием электрода и металла угольным стержнем или кратковременным разрядом высокой частоты и напряжения с помощью осциллятора.

Ручную сварку производят наклонной горелкой углом вперед, угол наклона к поверхности изделия составляет 70—80°. Присадочную проволоку подают под углом 10—15° (рис. 49). По окончании сварки дугу постепенно обрывают для заварки кратера, при ручной сварке — ее постепенным растяжением, при автоматической — специальным устройством заварки кратера, обеспечивающим постепенное уменьшение сварочного тока. Для защиты охлаждающегося металла подачу газа прекращают через 10—15 с после выключения тока.

Примерный режим ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыкового соединения из высоколегированной стали

толщиной 3 мм: диаметр вольфрамового электрода — 3—4 мм, диаметр присадочной проволоки 1,6—2 мм, сварочный ток — 120—160 А, напряжение на дуге 12—16 В, расход аргона — 6—7 л/мин.

Аргонодуговой сваркой выполняют швы стыковых, тавровых и угловых соединений. При толщине листа до 2,5 мм целесообразно производить сварку с отбортовкой кромок, при малой величине зазора (0,1—0,5 мм) можно сваривать тонколистовой металл толщиной от 0,4 до 4 мм без разделки кромок. Допустимый зазор тем меньше, чем меньше толщина свариваемого материала. Листы толщиной более 4 мм сваривают встык с разделкой, при этом допустимый зазор должен быть не более 1,0 мм.

Разновидности аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом. Разработано несколько разновидностей сварки вольфрамовым электродом, основанных на увеличении проплавляющей способности дуги за счет увеличения интенсивности теплового и силового воздействия дуги на свариваемый металл. К этим разновидностям относятся: сварка погруженной дугой, с применением флюса, при повышенном давлении защитной атмосферы, импульсно-дуговая, плазменная сварка.

Сварка погруженной дугой. С увеличением диаметра электрода и силы тока увеличивается давление дуги и удельное количество вводимого тепла. Под давлением дуги происходит оттеснение под электродом жидкого металла. Дуга при этом погружается в сварочную ванну, а поддержание заданного напряжения (длины дуги) достигается опусканием электрода ниже поверхности свариваемого металла. Глубина проплавления достигает 10—12 мм и выше, расход аргона в сопло горелки составляет 15—20 л/мин, в приставку для защиты остывающего шва — 15—30 л/мин и на обратную сторону шва 6—10 л/мин.

Сварка с применением флюса. Нанесение на поверхность свариваемого металла слоя флюса небольшой толщины (0,2—0,5 мм), состоящего из соединений фтора, хлора и некоторых окислов, способствует повышению сосредоточенности теплового потока в пятне нагрева и увеличению проплавляющей способности дуги. При этом благодаря концентрации тепловой энергии повышается эффективность проплавления и снижаются затраты погонной энергии при сварке.

Сварка при повышенном давлении защитной атмосферы. Мощность дуги возрастает с увеличением давления защитной атмосферы при неизменном токе и длине дуги. Дуга при этом сжимается, благодаря чему увеличивается ее проплавляющая способность примерно на 25—60%. Этот способ можно использовать при сварке в камерах с контролируемой атмосферой.

Импульсно-дуговая сварка вольфрамовым электродом. Заключается в применении в качестве источника тепла импульсной (пульсирующей) дуги с целью концентрации во времени теплового и силового воздействия дуги на основной и электродный металл. При стесненном теплоотводе пол-

нее используется тепло на расплавление основного металла, чем при сварке постоянной дугой. Проплавляющая способность импульсной дуги наиболее эффективно проявляется при сварке тонколистовых материалов толщиной 2—3 мм и меньше.

Дуга пульсирует с заданным соотношением импульса и паузы (рис. 50). Сплошной шов получается расплавлением отдельных точек с определенным перекрытием. Повторные возбуждения и устойчивость дуги обеспечиваются благодаря горению маломощной

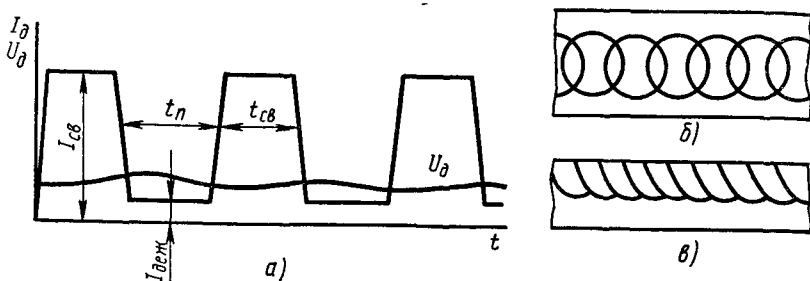


Рис. 50. Изменение сварочного тока и напряжения при импульсной сварке вольфрамовым электродом (а) и вид швов (б, в):

$I_{св}$ — сварочный ток, $I_{деж}$ — ток дежурной дуги, $t_{п}$ — время паузы, $t_{св}$ — время сварки

дежурной дуги (10—15% от силы тока в импульсе). Наряду с силой тока, напряжением, скоростью сварки к основным параметрам импульсно-дуговой сварки относятся длительность импульса ($t_{св}$) и паузы ($t_{п}$), длительность цикла сварки $T = t_{св} + t_{п}$ и шаг точек $S = v_{св}(t_{св} + t_{п})$, где $v_{св}$ — скорость сварки. Отношение $\frac{t_{п}}{t_{св}} = G$ называется жесткостью режима. Жесткость режима при заданной энергии импульса и длительности цикла характеризует проплавляющую способность дуги. Изменяя параметры режима импульсно-дуговой сварки можно в широких пределах изменять кристаллизацию металла и таким образом влиять на свойства сварных соединений. Технологические преимущества сварки импульсной дугой вольфрамовым электродом в наибольшей степени проявляются при сварке тонколистовых материалов — практически отсутствуют дефекты формирования шва, провисание и подрезы, улучшаются условия формирования шва в различных пространственных положениях, снижаются требования к квалификации сварщика при ручной сварке. Так как для сварки металла определенной толщины требуется значительно меньшая погонная энергия, существенно уменьшаются деформации и прожоги тонколистовых материалов. Таким образом, импульсно-дуговая сварка вольфрамовым электродом предназначена главным образом для регулирования проплавления основного металла и формирования шва при сварке тонколистового металла.

Сварка сжатой дугой осуществляется переменным или постоянным током прямой полярности. Возбуждают дугу с помощью осциллятора. Для облегчения возбуждения дуги прямого

действия используют дежурную дугу, горящую между соплом горелки и электродом. Для питания плазмообразующей дуги требуются источники питания сварочного тока с рабочим напряжением до 120 В, а в некоторых случаях и более высоким.

Сжатой дугой можно сваривать практически все металлы в нижнем и вертикальном положениях. В качестве плазмообразующего газа используют аргон и гелий, которые также могут быть и защитными. К преимуществам плазменной сварки относятся высокая производительность, малая чувствительность к колебаниям длины дуги, устранение включений вольфрама в металле шва. Без скоса кромок можно сваривать металл толщиной до 15 мм с образованием провара специфической грибовидной формы, что объясняется образованием сквозного отверстия в основном металле, через которое плазменная струя выходит на обратную сторону изделия. По существу, процесс представляет собой прорезание изделия с заваркой места резки. Плазменной струей сваривают стыковые и угловые швы. Стыковые соединения на металле толщиной до 2 мм можно сваривать с отбортовкой кромок, при толщине свыше 10 мм рекомендуется делать скос кромок. В случае необходимости используют дополнительный металл.

§ 38. Сварка в защитных газах плавящимся электродом

Сварка в защитных газах плавящимся электродом — дуговая сварка, осуществляемая с использованием плавящегося электрода и защитного газа, вдуваемого в зону дуги. Для защиты используют инертные и активные газы, а также их смеси (Ar , He , CO_2 , $Ar+CO_2$, CO_2+O_2 , $Ar+O_2$ и др.).

Основными разновидностями сварки плавящимся электродом в защитных газах являются аргонодуговая сварка и сварка в углекислом газе. Этот процесс является механизированным, сварку выполняют полуавтоматами и автоматами.

Схема поста для сварки в защитных газах плавящимся электродом приведена на рис. 47, в.

Сварка в защитных газах плавящимся электродом имеет ряд особенностей. Устойчивое горение дуги обеспечивается при высокой плотности постоянного тока (100 А/мм^2 и выше) на возрастающей ветви вольт-амперной характеристики (см. рис. 28). Стабильность параметров сварного шва (его глубина и ширина) зависит от постоянства длины дуги, которая обеспечивается процессами саморегулирования длины дуги за счет поддержания постоянной скорости подачи электродной проволоки, равной скорости ее плавления.

Так как условием устойчивого горения дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах является высокая плотность сварочного тока, то применяют электродную проволоку малого диаметра (обычно $d_s = 0,8 \div 2,5 \text{ мм}$), что приводит к необходимости применения больших скоростей подачи электродной проволоки.

При этих условиях процесс саморегулирования источниками питания с падающими характеристиками не обеспечивается. Поз-

тому для поддержания стабильной длины дуги и обеспечения процесса саморегулирования длины дуги необходимо применять источники питания постоянного тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой (преобразователи типа ПСГ-500 или выпрямители ВС-300, ИПП-300, ИПП-500 и др.). Сварку обычно ведут на постоянном токе обратной полярности при непрерывной подаче электродной проволоки. Сварку выполняют полуавтоматами и автоматами.

Наибольшее применение получили полуавтоматы типов А-547, ПДГ-500 и др.

Автоматы для сварки в защитных газах в основном тракторного типа — АДПГ-500, АДГ-500 и др.

Основные параметры режима и техника сварки. К основным параметрам режима сварки плавящимся электродом относятся сила тока, полярность, напряжение дуги, диаметр и скорость подачи электродной проволоки, состав и расход защитного газа, вылет электрода, скорость сварки. Сварку плавящимся электродом обычно выполняют на обратной полярности. При прямой полярности скорость расплавления в 1,4—1,6 раза выше, чем при обратной, однако дуга горит менее стабильно с интенсивным разбрызгиванием. Сварочный ток, от которого зависят размеры шва и производительность сварки, зависит от диаметра и состава проволоки, его устанавливают в соответствии со скоростью подачи проволоки.

Скорость сварки составляет обычно 15—80 м/ч, ее выбирают с учетом производительности и качества формирования шва. Качественные соединения можно получить при толщине металла для автоматической сварки $>0,5$ мм, полуавтоматической >1 мм, обычно сваривают толщины >3 мм.

Металлы толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок. Для улучшения формирования шва при толщине металла $>2—3$ мм сварку проводят на медной подкладке с формирующей канавкой или на остающейся подкладке из основного металла. Для сварки тонколистового металла используют проволоку диаметром 0,5—1,2 мм. Металл толщиной 4—12 мм обычно сваривают за два прохода с двух сторон без разделки, толщиной 15—20 мм — за два-три прохода с углом разделки 60° и притуплением 2—4 мм. При толщине 20—30 мм применяют двустороннюю разделку кромок с углом 60° и притуплением 2—4 мм. Металлы большей толщины целесообразно сваривать при узкой щелевой разделке кромок за несколько проходов.

Полуавтоматическую сварку выполняют обычно на меньших силах тока, чем автоматическую. Сварку можно выполнять в различных пространственных положениях с применением приемов удержания сварочной ванны. Техника сварки металла толщиной >2 мм при полуавтоматической сварке аналогична технике при ручной дуговой сварке покрытыми электродами.

Аргонодуговая сварка плавящимся электродом. Область применения этого вида — сварка цветных металлов (алюминия, магния, меди, титана и их сплавов) и легированных сталей.

Сварка происходит с капельным и струйным переносом. С увеличением тока капельный перенос металла электрода сменяется струйным и глубина проплавления увеличивается. Критическая величина тока, при которой капельный перенос сменяется струйным, составляет: при сварке сталей — от 60 до 120 А на 1 мм² сечения электродной проволоки, при сварке алюминия — 70 А.

Например, для проволоки марки Св-12Х18Н9Т разных диаметров при горении дуги в среде аргона критический ток имеет следующие значения:

Диаметр электрода, мм	1,0	2,0	3,0
Критический ток, А	190	280	350

При аргонодуговой сварке плавящимся электродом предъявляются более жесткие требования к сборке, чем при сварке вольфрамовым электродом, перед сваркой необходима тщательная очистка кромок свариваемых материалов и проволоки.

Сварка плавящимся электродом в углекислом газе. Этим способом можно сваривать подавляющее большинство сталей, удовлетворительно сваривающихся другими видами дуговой сварки. Наряду с другими преимуществами, которые характерны для сварки в защитных газах, сварка в углекислом газе характеризуется высокой производительностью и низкой стоимостью. К недостаткам ее относятся повышенное разбрызгивание и не всегда удовлетворительный внешний вид шва.

Основной особенностью сварки в углекислом газе плавящимся электродом является необходимость применения электродных проволок с повышенным содержанием элементов — раскислителей кремния Si и марганца Mn, компенсирующих их выгорание в зоне сварки, предотвращающих дополнительное окисление металла при сварке и образование пор. Для углеродистых сталей в основном используют сварочные проволоки сплошного сечения Св-10ГС, Св-08Г2С, а также порошковые проволоки, содержащие порошки ферросплавов FeSi, FeMn. Причины окисления и образования пор при сварке в углекислом газе следующие. При сварке углекислый газ диссоциирует в зоне дуги с образованием атомарного кислорода по реакции $CO_2 \rightarrow CO + O$, $CO \rightarrow C + O$. Атомарный кислород окисляет железо и легирующие присадки, содержащиеся в стали $Fe + O \rightarrow FeO$. В результате этого металл сварочной ванны насыщается кислородом, а его свойства ухудшаются. При охлаждении расплавленного металла углерод, содержащийся в стали, окисляясь, будет способствовать образованию окиси углерода по реакции $C + O \rightarrow CO$, $FeO + C \rightarrow CO + Fe$.

Образующийся при кристаллизации металла шва CO выделяется в виде пузырьков, часть из которых, не успевая выделиться, задерживается в металле шва, образуя поры.

В том случае, если сварочная проволока легирована кремнием и марганцем, окислы железа раскисляются не за счет углерода, а в основном за счет кремния и марганца из сварочной проволоки и

таким образом предотвращается образование окиси углерода при кристаллизации и образование пор.

Раскисление окислов железа идет по реакциям $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$, $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{MnO} + \text{Fe}$.

Устойчивый процесс обеспечивается при высоких плотностях тока, поэтому используют проволоку малого диаметра 0,8—2,5 мм. Величину сварочного тока устанавливают и определяют скоростью подачи сварочной проволоки. Напряжение дуги должно быть менее 32 В, так как с увеличением напряжения и длины дуги увеличивается разбрызгивание и окисление. Обычно $U_s = 20 \div 30$ В. Скорость сварки от 20 до 80 м/ч, расход газа — 6—25 л/мин. Например, при полуавтоматической сварке низкоуглеродистой стали толщиной 8 мм сварку можно проводить проволокой диаметром 2 мм, на токе 260—280 А, при напряжении 28—30 В, расходе газа 15—20 л/мин за 1 проход.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сварки в защитных газах?
2. Какие способы защиты зоны сварки используют при сварке в защитных газах?
3. Какие разновидности аргодуговой сварки вольфрамовым электродом вы знаете?
4. Почему для сварки в защитных газах плавящимся электродом используют источники питания с жесткой характеристикой?
5. Назовите основные параметры режима при сварке плавящимся электродом в защитных газах.
6. В чем заключаются особенности сварки в углекислом газе?

Глава 11. ДУГОВАЯ НАПЛАВКА И РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

§ 39. Общие сведения о наплавке

Наплавка — процесс нанесения при помощи сварки слоя металла на поверхность изделия. Наплавку применяют для восстановления изношенных деталей и получения изделий с заданными свойствами поверхности: износостойкостью при нормальных и повышенных температурах, жаропрочностью, жаростойкостью, кислотостойкостью и другими свойствами.

Для наплавки применяют в основном дуговые виды сварки: ручную плавящимися и неплавящимися электродами, полуавтоматическую и автоматическую под флюсом и в защитных газах, вибродуговую, плазменную. Наряду с дуговой применяют газовую, электрошлаковую, индукционную, печную наплавку.

Схемы основных способов дуговой и электрошлаковой наплавки приведены на рис. 51.

Наплавка имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с соединительной сваркой.

При наплавке поверхностных слоев с заданными свойствами химический состав наплавленного металла существенно отличается от химического состава основного металла. Наплавляемый металл

выбирают с учетом эксплуатационных требований и свариваемости. Существует несколько способов получения легированного металла заданного химического состава:

использование легированного электродного стержня, электродной проволоки или ленты сплошного сечения и нелегирующих покрытий, флюса или защитного газа;

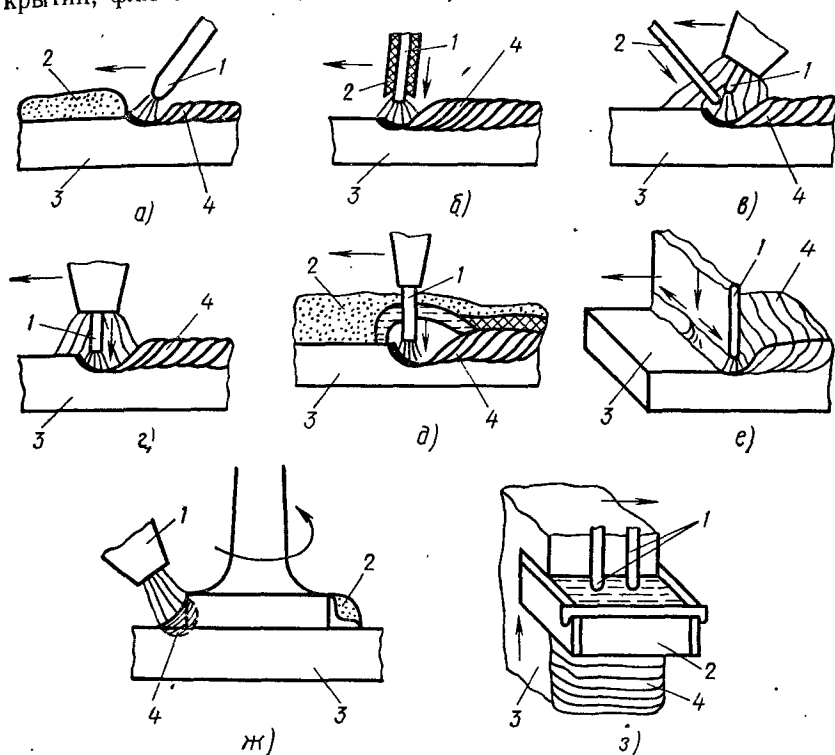


Рис. 51. Схемы основных способов наплавки плавлением:

a — угольным (графитовым) электродом (1) расплавлением слоя сыпучего зернистого наплавочного сплава (2), *б* — ручной дуговой покрытым электродом (1) или легирующим покрытием (2), *в* — неплавящимся вольфрамовым электродом (1) в защитных инертных газах с подачей в дугу присадочного прутка (2), *г* — плавящимся электродом проволокой (1) в защитных газах, *д* — механизированная (автоматическая, полуавтоматическая) дуговая плавящейся проволокой (1) под флюсом (2), *е* — плавящейся лентой (1) в защитных газах или под флюсом, *ж* — расплавлением плазменной струей плазмотрона (1), предварительно наложенного или спеченного из порошков наплавочного материала (2), *з* — электрошлаковая наплавка плавящимися электродами (1) с перемещаемым составным медным ползуном (2), во всех случаях *3* — наплавляемая деталь, *4* — наплавленный слой

использование проволок и лент с легирующими наполнителями в сочетании с нелегирующими покрытиями, флюсом или защитным газом;

использование нелегированного электродного стержня, проволоки или ленты и легирующего покрытия или флюса;

нанесение легирующих примесей в виде порошков, паст, брикетов и т. д. на поверхность, подлежащую наплавке.

Возможны комбинации этих методов.

Технологическими требованиями и особенностями наплавки по сравнению с соединительной сваркой являются:

минимальное перемешивание наплавляемого слоя с основным металлом для обеспечения заданного химического состава слоя и предотвращающего трещин;

обеспечение минимальной зоны термического влияния;
минимальные деформации и напряжения.

Эти требования обеспечиваются за счет уменьшения глубины проплавления регулированием параметров режима, погонной энергии, техники наплавки, колебаниями электрода, увеличением его вылета, применением широкой ленты малой толщины, наплавкой симметричных слоев вразброс, их проковкой после наплавки и другими технологическими приемами.

Техника наплавки должна обеспечивать максимальную производительность наплавки, т. е. максимальное количество расплавленного электродного (присадочного) металла в единицу времени.

Производительность наплавки, выполняемой различными способами и приемами, примерно следующая (кг/ч):

ручная дуговая сварка покрытыми электродами — 0,8—3;

автоматическая под флюсом одним электродом — 2—15, лентой — 5—30;

в углекислом газе — 1,5—8;

самозащитной порошковой проволокой — 2—9, лентой — 10—20;

электрошлаковая проволочными электродами — 20—60, электродом большого сечения — до 150;

плазменная — 2—12;

вибродуговая — 1,2—3.

Техника наплавки при использовании электродной проволоки предусматривает наложение ниточных валиков с перекрытием предыдущего валика на $\frac{1}{3}$ его ширины или валиков с поперечными колебаниями электрода. Наплавку можно вести также ниточными валиками на некотором расстоянии один от другого, после удаления шлака со всех валиков наплавляют валики в свободных промежутках.

При наплавке плоских поверхностей целесообразно применять широкие валики, т. е. вести процесс с колебательными движениями, а также использовать электродные ленты.

Наплавку тел вращения выполняют вдоль образующей или круговыми валиками по винтовой линии. Для уменьшения деформаций и напряжений применяют проковку после наплавки.

§ 40. Виды наплавки

Ручную дуговую наплавку применяют при восстановлении изношенных поверхностей, восстановлении брака литья и для наплавки поверхностей со специальными свойствами.

Ручную дуговую наплавку выполняют покрытым плавящимся и неплавящимся электродами. Перед наплавкой плавящимся элект-

родом поверхность детали должна быть тщательно зачищена, после чего приступают к наплавке металла отдельными валиками. При этом каждый последующий валик должен расплавлять предыдущий на $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ ширины. Электроды выбирают, исходя из условий эксплуатации наплавляемой поверхности.

Порошковые смеси наплавляют угольным (графитовым) электродом постоянным током прямой полярности. На очищенную от загрязнений поверхность насыпают тонкий слой флюса (0,2—0,3 мм), чаще всего прокаленную буру, затем слой шихты высотой 3—5 мм и шириной 20—60 мм. Дугу возбуждают на основном металле, затем переносят на шихту, шихта расплавляется с минимальным проплавлением основного металла.

Автоматическую наплавку под флюсом производят проволоками сплошного сечения и порошковыми. Наплавку можно выполнять одним электродом отдельными валиками, одновременно несколькими электродами и электродной лентой. Используют ленты сплошного сечения и порошковые.

Наплавка плавящимся и неплавящимся электродом в среде защитных газов. Наплавку вольфрамовым электродом проводят в среде аргона. Необходимые свойства наплавленного металла обеспечиваются применением присадочных проволок специального состава или вдуванием легирующих порошков в зону дуги.

Можно производить наплавку в инертных газах и плавящимся электродом. Однако применение той же технологии, что и для сварки, ведет к повышенному содержанию основного металла в наплавке. Поэтому используют дополнительную присадочную проволоку. Этот способ широко используют при наплавке высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов.

Плазменная наплавка осуществляется несколькими способами:

плазмой прямого действия с подачей присадочной наплавочной проволоки;

с подачей присадочного порошка в плазменную струю;

по слою легирующего материала, нанесенного на поверхность изделия;

с токоведущей присадочной проволокой;

с двумя плавящимися электродами.

Электрошлаковая наплавка производится на плоские и цилиндрические поверхности для создания поверхностных слоев с особыми свойствами и для создания промежуточных слоев на кромках заготовок для последующей сварки. Техника электрошлаковой наплавки принципиально не отличается от техники сварки.

Вибродуговую наплавку применяют в основном как средство восстановления быстроизнашивающихся деталей станочного, металлургического, сельскохозяйственного оборудования. Этому виду наплавки могут подвергаться детали диаметром 8—10 мм и выше. Сущность вибродуговой наплавки заключается в том,

что наплавку осуществляют с помощью специальной головки, обеспечивающей подачу и вибрацию электродной проволоки. Вибрация электрода облегчает возбуждение дуги и повышает стабильность процесса. При наплавке электрические разряды чередуются с короткими замыканиями. В зону наплавки и дуги подается щелочная эмульсия, в некоторой степени защищающая металл от воздействия воздуха в процессе наплавки и охлаждающая детали, в связи с чем уменьшаются зона термического влияния и сварочные деформации и повышается твердость наплавленного слоя.

Наплавку газокислородным пламенем применяют редко из-за относительно больших деформаций наплаваемых деталей. Газокислородное пламя используют главным образом для наплавки литыми твердыми сплавами.

§ 41. Дуговая резка металлов

Интенсивный нагрев металла электрической дугой успешно используют в технике не только для сварки, но и для резки металла (рис. 52).

Нашли применение следующие способы дуговой резки:

ручная дуговая резка неплавящимся и плавящимся покрытым электродом, используемыми при сварке;

воздушно-дуговая резка;
кислородно-дуговая резка;
резка сжатой дугой.

Ручную дуговую резку неплавящимся и плавящимся

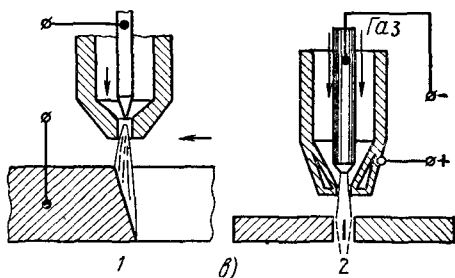
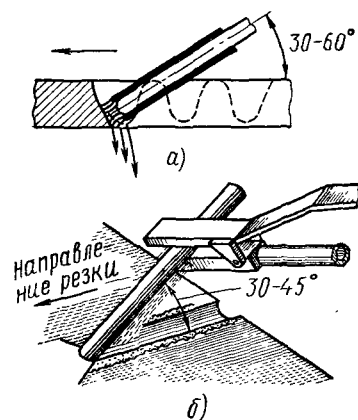


Рис. 52. Схемы дуговой резки металла:

а — ручная дуговая плавящимся электродом, б — воздушно-дуговая, а — плазменная (1 — дугой, 2 — струей)

электродом используют как вспомогательную операцию. При дуговой резке неплавящимся электродом применяют угольные и графитовые электроды. Резка обеспечивается за счет выплавления металла из зоны реза, а не за счет его сгорания в струе кислорода, как при газовой резке. Поэтому благодаря высокой температуре нагрева, могут разрезаться материалы, не подвергающиеся кислородной резке (чугун, высоколегированные стали, цветные металлы). Применяют постоянный и переменный ток максимальной

мощности. Для этого способа характерна очень малая точность и чистота реза.

При дуговой сварке плавящимся электродом рез получается более чистый и узкий, чем при резке неплавящимся электродом. Резку выполняют методом опирания. Наличие покрытия приводит при резке к повышению устойчивости дуги, замедлению плавления стержня электрода, изоляции его от стенок реза и ускорению резки благодаря окислению расплавленного металла компонентами покрытия. Ток при резке на 20—30% выше, чем при сварке.

При воздушно-дуговой резке металл расплавляется теплом электрической дуги, а затем выдувается сжатым воздухом из зоны реза. При этом небольшая часть металла сгорает в кислороде, содержащемся в воздухе. Этот способ применяют для удаления дефектных мест под заварку и разделительной резки листов из нержавеющей стали толщиной до 20 мм. Резку проводят на постоянном токе угольным (графитовым) электродом с помощью специальных резаков обычно с боковой подачей сжатого воздуха под давлением 0,4—0,5 МПа.

Кислородно-дуговая резка заключается в том, что разрезаемый металл разогревается с помощью электрической дуги, а затем сжигается струей кислорода, подаваемой к месту реза параллельно электроду. Окислы, получаемые при сгорании металла, выдуваются из места реза этой же струей кислорода. Применяют угольные и графитовые электроды, а также специальные плавящиеся трубчатые электроды с подачей кислорода через внутреннее отверстие. Способ используется ограниченно.

Резка плазменной струей основана на расплавлении металла в месте реза и его выдувании потоком плазмы. Плазменную струю используют для резки металла толщиной от долей до десятков миллиметров. Для резки металла малой толщины используют плазменную струю косвенного действия. При повышенной толщине металла лучшие результаты достигаются при плазменной струе прямого действия (см. рис. 8, б). Благодаря высокой температуре и большой кинетической энергии плазменной струи резке подвергаются практически все металлы.

В зависимости от металла в качестве плазмообразующих газов можно использовать азот, водород, аргоно-водородные, аргоно-азотные, азотно-водородные смеси. Использование для резки двухатомных газов (H_2 , N_2) энергетически более выгодно. Двухатомный газ поглощает при диссоциации в плазматроне тепло, которое переносится и выделяется на поверхности реза, где происходит объединение свободных атомов в молекулы. При использовании электродов из циркониевых и гафниевого сплавов в качестве плазмообразующего газа при резке можно использовать воздух.

Контрольные вопросы

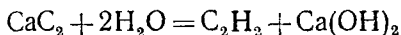
1. В чем заключается сущность наплавки?
2. Какие особенности имеет наплавка по сравнению со сваркой?
3. В чем сущность ручной дуговой наплавки?

4. Опишите основные способы механизированной наплавки.
5. На каком принципе основана дуговая резка металла?
6. В чем сущность и преимущества плазменной резки?

Глава 12. ГАЗОВАЯ СВАРКА И РЕЗКА

§ 42. Оборудование и аппаратура для газовой сварки и резки

Ацетиленовые генераторы. Ацетиленовым генератором называется аппарат, служащий для получения ацетилена при разложении карбида кальция водой:



Теоретически для разложения 1 кг карбида кальция требуется 0,562 кг воды, но так как реакция разложения идет с большим выделением тепла, практически берут от 5 до 20 кг воды.

Ацетиленовые генераторы для сварки и резки классифицируются по следующим признакам:

по производительности — от 0,5 до 160 м³/ч;

по давлению вырабатываемого ацетилена — низкого давления до 10 кПа и среднего давления от 70 до 150 кПа;

по способу применения — на передвижные с производительностью 0,5—3 м³/ч и стационарные с производительностью 5—160 м³/ч;

в зависимости от взаимодействия карбида кальция с водой—генераторы системы КВ («карбид в воду»), в которых разложение карбида кальция осуществляется при подаче определенного количества карбида кальция в воду, находящуюся в реакционном пространстве; генераторы системы ВК («вода на карбид»), в которых разложение карбида кальция происходит при подаче определенного количества воды в реакционное пространство, где находится карбид кальция; генераторы системы ВВ («вытеснение воды»), в которых разложение карбида кальция осуществляется при соприкосновении его с водой в зависимости от изменения уровня воды, находящейся в реакционном пространстве и вытесняемой образующимся газом; комбинированные генераторы.

Все ацетиленовые генераторы независимо от их системы имеют следующие основные части: газообразователь, газосборник, предохранительный затвор, автоматическую регулировку вырабатываемого ацетилена в зависимости от его потребления.

Схемы ацетиленовых генераторов различных систем представлены на рис. 53.

Предохранительные затворы. Предохранительные затворы — устройства, предохраняющие ацетиленовые генераторы и газопроводы от попадания в них взрывной волны при обратных ударах пламени из сварочной горелки или резака.

Обратным ударом называется воспламенение горючей смеси в каналах горелки или резака и распространение пламени по шлан-

гу горючего газа. Горящая смесь газов при обратном ударе устремляется по ацетиленовому каналу горелки или резака в шланг и при отсутствии предохранительного затвора — в ацетиленовый генератор, что может привести к взрыву ацетиленового генератора.

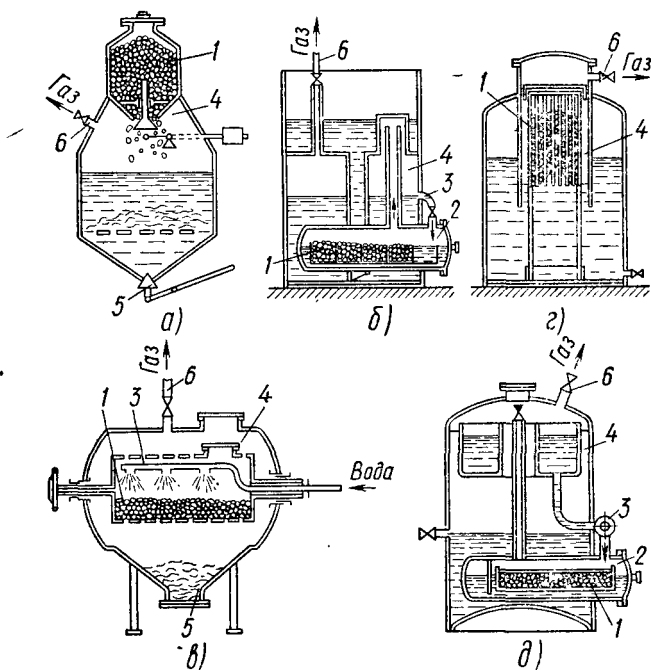


Рис. 53. Схемы ацетиленовых генераторов:

а — «карбид в воду», *б* — «вода в карбид», *в* — «сухого разложения», *г* — «вытеснения», *д* — комбинированная система «вода в карбид» и «вытеснения»; 1 — бункер или барабан с карбидом кальция, 2 — реторта, 3 — система подачи воды, 4 — газосборник, 5 — спуск ила, 6 — отбор газа

Обратный удар может произойти в случае, если скорость истечения горючей смеси станет меньше скорости ее сгорания, от перегрева и засорения канала мундштука горелки.

Предохранительные затворы бывают жидкостные и сухие. Жидкостные затворы заливают водой, сухие — заполняют мелкопористой металлокерамической массой. Затворы классифицируют по пропускной способности — 0,8; 1,25; 2,0; 3,2 м³/ч; по предельному давлению — низкого давления, в которых предельное давление ацетилена не превышает 10 кПа, среднего давления — 70 кПа и высокого давления — 150 кПа.

Предохранительные затворы устанавливают между ацетиленовым генератором или ацетиленопроводом (при многопостовом питании от стационарных генераторов) и горелкой или резаком.

Принцип действия водяного затвора показан на рис. 54. Корпус 3 затвора заполняют водой до уровня контрольного крана КК. Ацетилен подводится по трубке 1, проходит через обратный клапан 2,

расположенный в нижней части корпуса. В верхнюю часть корпуса газ проходит через отражатель 4. Ацетилен отводится к месту потребления через расходный кран *РК*. В верхней части корпуса имеется трубка, закрытая мембраной 5 из алюминиевой фольги. При обратном ударе мембрана разрывается и взрывчатая смесь выходит наружу. Давление взрыва через воду 6 передается на клапан 2, который закрывает подвод газа от генератора. После выхода взрывчатой смеси мембрану заменяют.

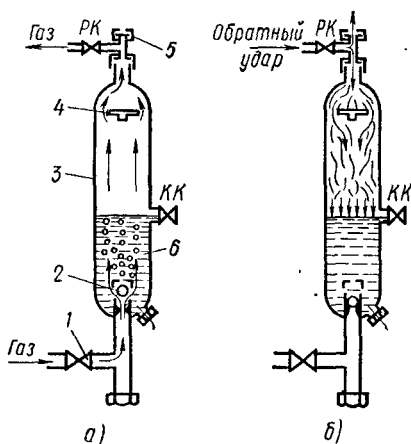


Рис. 54. Схема водяного затвора:
а — при нормальной работе, б — при обратном ударе

резьбой, куда ввертывается запорный вентиль разной конструкции для горючих газов и кислорода.

Каждому газу соответствует свой условный цвет баллона и наименование газа, например кислородные баллоны окрашивают в голубой цвет, надпись делают черной краской; ацетиленовый — соответственно в белый и красной краской; водородный — в темно-зеленый и красной краской, пропан — в красный и белой краской.

Кислород наполняют в баллоны до давления 15,0 МПа. Баллон емкостью 40 дм³ при давлении газа 15,0 МПа содержит кислорода 6 м³.

Питание постов газовой сварки и резки от ацетиленовых генераторов связано с рядом неудобств, поэтому большое распространение получило питание ацетиленом от ацетиленовых баллонов. Ацетиленовые баллоны заполняют пористой массой (древесный уголь, пемза, инфузорная земля), образующей микрополости, необходимые для безопасного хранения ацетилена. Массу в баллоне пропитывают ацетоном (225—300 г на 1 дм³ вместимости баллона), в котором хорошо растворяется ацетилен. При нормальных условиях в одном объеме ацетона растворяется 23 объема ацетилена. Давление растворенного ацетилена в наполненном баллоне не должно превышать 1,9 МПа при 20°С. Для уменьшения потерь ацетона из баллона ацетилен необходимо отбирать со скоростью не более 1700 дм³/ч.

Баллоны снабжены вентилями — запорными устройствами, ко-

торые позволяют сохранить в баллоне сжатый или сжиженный газ. Каждый вентиль имеет шпindel, который перемещается при вращении маховика, открывая или закрывая клапан.

Редуктор для газопламенной обработки—прибор для понижения давления газа, при котором он находится в баллоне или магистрали, до величины рабочего давления и для автоматического поддержания этого давления постоянным. Редуктор имеет клапан, управляемый гибкой мембраной, на которую с одной стороны действует сила пружины, а с другой — давление газа. Регулированием силы пружины обеспечивается заданное давление и расход газа.

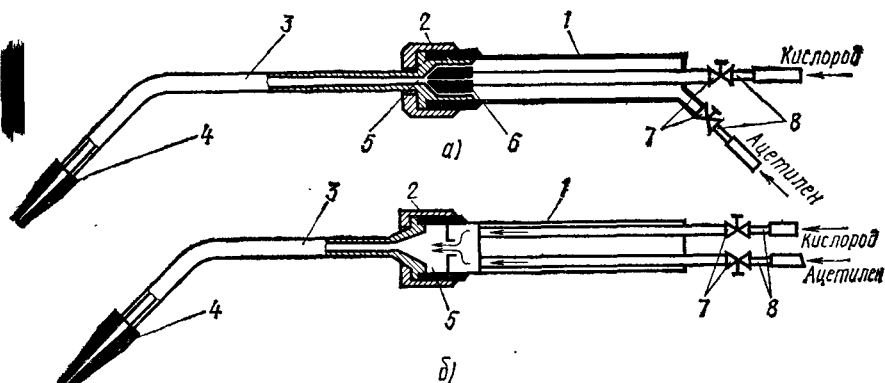


Рис. 55. Схемы ацетиленовых горелок:
а — инжекторные, б — безинжекторные

Редукторы, применяемые в сварочной технике, классифицируются по принципу действия (обратного и прямого действия), по назначению и месту установки, по схемам редуцирования и роду редуцируемого газа.

Сварочная горелка. Основным инструментом газосварщика является сварочная горелка. *Сварочной горелкой* называется устройство, служащее для смешивания горючего газа или паров горючей жидкости с кислородом и получения сварочного пламени. Каждая горелка позволяет регулировать мощность, состав и форму сварочного пламени. Сварочные горелки согласно ГОСТ 1077—69 классифицируются: по способу подачи горючего газа и кислорода в смесительную камеру — инжекторные и безинжекторные; по роду применяемого газа; по назначению — универсальные и специализированные; по числу пламени — однопламенные и многопламенные; по мощности — малой мощности (расход ацетилена 25—400 дм³/ч), средней мощности (400—2800 дм³/ч), большой мощности (2800—7000 дм³/ч); по способу применения — ручные и машинные.

Наибольшее применение имеют инжекторные горелки, работающие на смеси ацетилена с кислородом. В инжекторных горелках подачу горючего газа в смесительную камеру осуществляют подсосом его струей кислорода, подаваемого в горелку с большим давлением,

чем горючий газ. Этот процесс подсоса называется инжекцией. Схема инжекторной горелки показана на рис. 55.

Кислород под давлением поступает в горелку и через соединительный штуцер 8 и регулировочный вентиль 7 подается к инжектору 6. Выходя с большой скоростью из узкого канала инжекторного конуса, кислород создает значительное разрежение в камере 5 и засасывает горючий газ, поступающий через ацетиленовые каналы горелки в камеру смесителя 5, где и образуется горючая смесь. Затем горючая смесь поступает по наконечнику 3 к мундштуку 4, на выходе из которого при сгорании образует сварочное пламя (2 — гайка, 1 — ствол горелки).

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

В безынжекторных горелках горючий газ и кислород подают примерно под одинаковым давлением до 100 кПа. В них отсутствует инжектор, который заменен простым смесительным соплом, ввертываемым в трубку наконечника горелки.

Газокислородные резаки. Газокислородная резка может быть ручной и машинной. Для ручной резки применяют ручные резаки. Резаки служат для смешения горючего газа с кислородом для образования подогревающего пламени и подачи к разрезаемому металлу струи режущего кислорода.

Ручные резаки для газовой резки классифицируют по следующим признакам:

роду горючего газа, на котором они работают — для ацетилена, газов-заменителей, жидких горючих;

принципу смешения горючего газа и кислорода — на инжекторные и безынжекторные;

назначению — универсальные и специальные;

виду резки — для разделительной, поверхностной, кислородно-флюсовой, копьевой.

В настоящее время широкое применение получили универсальные инжекторные резаки, позволяющие резать сталь толщиной от 3 до 300 мм. Схема газокислородного резака показана на рис. 56. В резаке конструктивно объединены подогревающая и режущая части. Подогревающая часть аналогична устройству сварочной горелки. Режущая часть состоит из дополнительной трубки 5 для подачи режущего кислорода и вентиля 4 для регулировки подачи. В мундштуке 3 находятся два концентрически расположенных отверстия для выхода подогревающего пламени 1 и режущей струи 2. Газы в мундштук подают и регулируют с помощью соответствующих вентиляей.

Специальные горелки и резаки. Для газопламенной обработки материалов наряду с универсальными используют специальные горелки и резаки для термической обработки, поверхностной очистки, пайки, сварки термопластов, газопламенной наплавки и др. резаки для поверхностной, копьевой, кислородно-флюсовой резки для резки металла больших толщин.

Машины для кислородной резки. Для повышения производительности, качества реза и сокращения тяжелого ручного труда используют машинную резку. Машины для кислородной резки разделяют на два основных типа: стационарные и переносные. Каждая машина состоит из несущей части, резака (одного или нескольких), пульта управления и ведущего механизма. У стационарных машин основным узлом, автоматизирующим процесс резки,

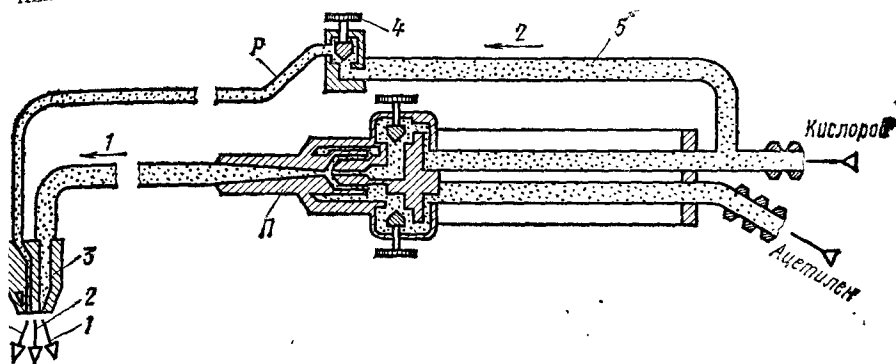


Рис. 56. Схема газокислородного резака:
Р — режущая часть, П — подогревающая часть

является система копирования. В таких машинах применяют принципы механического, электромагнитного, фотоэлектронного, дистанционно-масштабного и программного копирования.

Переносные машины изготовляют в виде самоходной тележки, перемещающейся электродвигателем, пружинным механизмом или газовой турбинкой.

Машину устанавливают на разрезаемый лист или трубу и направляют по разметке, циркульному устройству, направляющим или гибкому копиру.

Основным рабочим инструментом машины для кислородной резки является машинный газовый резак. Используют следующие основные типы машинных резаков: инжекторные, равного давления и внутрисоплового смешения.

§ 43. Технология газовой сварки

Газовая сварка — это сварка плавлением, при которой металл в зоне соединения нагревают до расплавления газовым пламенем (рис. 57). При нагреве газовым пламенем 4 кромки свариваемых заготовок 1 расплавляются вместе с присадочным металлом 2, который может дополнительно вводиться в пламя горелки 3. После затвердевания жидкого металла образуется сварной шов 5.

К преимуществам газовой сварки относятся простота способа, несложность оборудования, отсутствие источника электрической энергии. Оборудование поста для газовой сварки показано на рис. 58. К недостаткам газовой сварки относится меньшая произ-

водительность, сложность механизации, большая зона нагрева и более низкие механические свойства сварных соединений, чем при дуговой сварке.

Газовую сварку используют при изготовлении и ремонте изделий из тонколистовой стали толщиной 1—3 мм, сварке чугуна, алюминия, меди, латуни, наплавке твердых сплавов, исправлении дефектов литья и др.

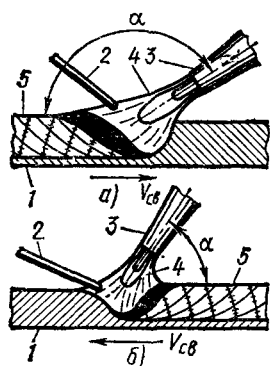


Рис. 57. Схема газовой сварки:
а — правым, б — левым способом

В зависимости от свариваемого материала, его толщины и типа изделия выбирают следующие основные параметры режима сварки: мощность сварочного пламени, вид пламени, марку и диаметр присадочной проволоки, способ и технику сварки.

Тепловую мощность сварочного пламени определяют расходом ацетилена, проходящего за один час через горелку. Она регулируется сменными наконечниками горелки (номером наконечника). Мощность определяют по эмпирической формуле $Q_a = AS$, где Q_a — расход ацетилена, $\text{дм}^3/(\text{ч} \cdot \text{мм})$; S — толщина металла, мм; A — коэффициент, определяемый опытным путем, $\text{дм}^3/(\text{ч} \cdot \text{мм})$; для углеродистых сталей $A = 100 \div 130$, для меди — 150, для алюминия — $75 \text{ дм}^3/(\text{ч} \cdot \text{мм})$.

Для сварки различных металлов требуется определенный вид пламени — нормальное ($\beta = \frac{V_{O_2}}{V_{C_2H_2}} = 1 - 1,3$), окислительное ($\beta > 1,3$) или науглероживающее ($\beta < 1$). Газосварщик устанавливает и регулирует вид сварочного пламени на глаз. Нормальным пламенем сваривают большинство сталей.

Окислительным пламенем, которое имеет голубоватый оттенок и заостренную форму ядра, используют при сварке латуни. Науглероживающее пламя, которое становится коптящим, удлиняется и имеет красноватый оттенок, используют в основном для сварки чугуна для компенсации выгорающего при сварке углерода.

В практике применяют два способа сварки: правый и левый (см. рис. 57). Правым называется такой способ, когда сварка производится слева направо, сварочное пламя направляется на сваренный участок шва, а присадочная проволока перемещается вслед за горелкой. Так как при правом способе пламя направлено на сваренный шов, то обеспечивается лучшая защита сварочной ванны от кислорода и азота воздуха, большая глубина проплавления, замедленное охлаждение металла шва в процессе кристаллизации. Тепло пламени рассеивается меньше, чем при левом способе, поэтому угол разделки кромок делается не 90° , а $60-70^\circ$, что уменьшает количество наплавленного металла и коробление. При правом способе производительность на 20—25% выше, а расход газов на 15—20% ниже.

меньше, чем при левом. Правый способ целесообразно применять при сварке металла толщиной более 5 мм и металлов с большой теплопроводностью.

Левым способом газовой сварки называют такой способ, при котором сварка производится справа налево, сварочное пламя направляется на еще не сваренные кромки металла, а присадочная проволока перемещается впереди пламени. При левом способе сварщик хорошо видит свариваемый металл, поэтому внешний вид шва лучше, чем при правом способе; предварительный подогрев кромок свариваемого металла обеспечивает хорошее перемешивание сварочной ванны. Благодаря этим свойствам левый способ наиболее распространен и применяется для сварки тонколистовых материалов и легкоплавких металлов.

Мощность сварочной горелки при правом способе выбирают из расчета 120—150 дм³/ч ацетилена, а при левом 100—130 дм³/ч на 1 мм толщины свариваемого металла.

Диаметр присадочной проволоки выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла и способа сварки. При правом способе сварки диаметр присадочной проволоки $d=S/2$ мм, но не более 6 мм, при левом $d=S/2+1$ мм, где S — толщина свариваемого металла, мм.

Скорость нагрева регулируют изменением угла наклона α мундштука к поверхности свариваемого металла. Чем толще металл и больше его теплопроводность, тем больше угол наклона мундштука к поверхности свариваемого металла.

В процессе сварки газосварщик концом мундштука горелки совершает одновременно два движения: поперечное — перпендикулярно оси шва и продольное — вдоль оси шва (рис. 59). Основным является продольное движение. Поперечное движение служит для равномерного прогрева кромок основного металла и получения шва необходимой ширины.

Газовой сваркой можно выполнять нижние, горизонтальные (на вертикальной плоскости), вертикальные и потолочные швы. Горизонтальные и потолочные швы обычно выполняют правым способом сварки, вертикальные снизу вверх левым способом.

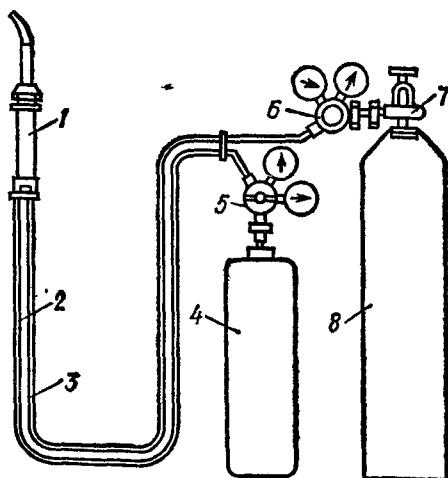


Рис. 58. Оборудование поста для газовой сварки:

1 — горелка, 2 — шланг для подвода ацетилена, 3 — шланг для подвода кислорода, 4 — ацетиленовый баллон, 5 — ацетиленовый редуктор, 6 — кислородный редуктор, 7 — кислородный вентиль, 8 — кислородный баллон

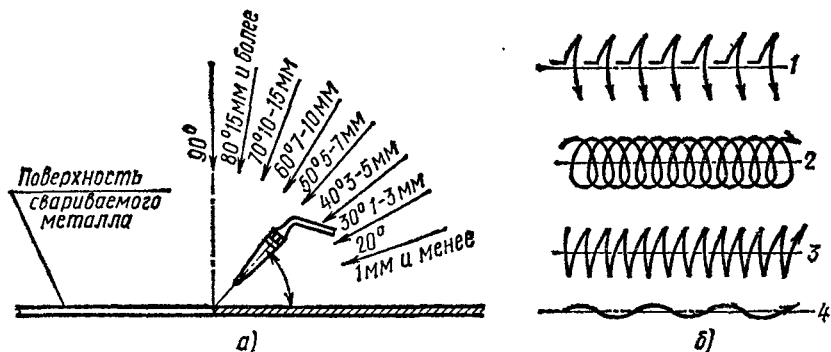


Рис. 59. Углы наклона мундштука горелки при сварке различных толщин (а) и способы перемещения мундштука горелки (б):
1 — с отрывом горелки, 2 — спиралеобразный, 3 — полумесяцем, 4 — волнистый

§ 44: Технология газокислородной резки

Сущность кислородной резки. Кислородной резкой называют способ разделения металла, основанный на использовании для его нагрева до температуры воспламенения теплоты газового пламени и экзотермической (с выделением тепла) реакции окисления металла и для удаления окислов — кинетической энергии режущего кислорода.

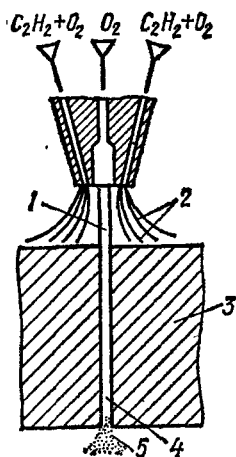
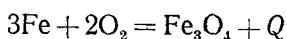


Рис. 60. Схема газокислородной резки

По характеру и направленности кислородной струи различают три основных вида резки: разделительная, при которой образуются сквозные разрезы; поверхностная, при которой снимается поверхностный слой металла кислородным копьём, заключающаяся в прожигании в металле глубоких отверстий.

На рис. 60 показана схема разделительной резки. Металл 3 нагревается в начальной точке реза до температуры воспламенения (в кислороде для стали до 1000—1200°C) подогревающим ацетилено-кислородным пламенем 2, затем направляется струя режущего кислорода 1 и нагретый металл начинает гореть с выделением значительного количества тепла по реакции



Тепло от горения железа вместе с подогревающим пламенем разогревает лежащие ниже слои и распространяется на всю толщину металла. Чем меньше толщина разрезаемого металла, тем больше роль подогревающего пламени (при толщине 5 мм до 80% общего количества тепла, выделяемого при резке, при толщине более 50 мм — только 10%). Образующиеся окислы 5, а также частично расплавленный металл, удаляются из зоны реза 4 под действием кинети-

ческой энергии струи кислорода. Непрерывный подвод тепла и режущего кислорода обеспечивают непрерывность процесса.

Условия резки и разрезаемость. Для обеспечения нормального процесса резки должны быть выполнены следующие условия.

1. Источник тепла должен иметь необходимую мощность, чтобы обеспечить нагрев металла до требуемой температуры реакции сгорания металла, а количество тепла, выделяющегося при сгорании металла в кислородной струе, должно быть достаточным для поддержания непрерывного процесса резки.

2. Температура плавления металла должна быть выше температуры его окисления (горения) в кислороде, иначе металл при нагреве будет плавиться и принудительно удаляться из разреза без характерного для процесса резки окисления, являющегося главным источником тепла.

3. Температура плавления металла должна быть выше температуры плавления образующихся в процессе резки окислов, иначе тугоплавкие окислы изолируют металл от контакта с кислородом и затрудняют процесс резки.

4. Образующиеся окислы и шлак должны быть жидкотекучими и легко выдуваться струей режущего кислорода, иначе контакт кислорода с жидким металлом будет замедлен или вовсе невозможен.

Всем перечисленным условиям удовлетворяет углеродистая сталь, поэтому ее можно резать кислородом.

Первому условию при газовой резке не удовлетворяет медь в связи с ее высокой теплопроводностью, сильно затрудняющей начало процесса резки, и низким тепловыделением при окислении. Поэтому мощности газовых резаков недостаточно для резки меди и медь можно резать, применяя более мощный тепловой источник — электрическую дугу.

Второму и четвертому условию не удовлетворяет чугун. По мере повышения содержания углерода в железе процесс резки значительно ухудшается из-за снижения температуры плавления и повышения температуры воспламенения. Чугун, содержащий более 1,7% углерода, кислородной резкой не обрабатывается. Кроме того, вязкость шлака значительно возрастает при увеличении содержания кремния, который обязательно содержится в чугуне, что также является одной из причин невозможности вести кислородную резку чугуна.

Третье условие не удовлетворяется при резке алюминия, магния и их сплавов, а также сталей с большим содержанием хрома и никеля. При нагревании этих сплавов в процессе резки на их поверхности образуется пленка тугоплавкого окисла, препятствующая поступлению кислорода к неокисленному металлу.

Для повышения производительности и качества реза применяют ряд разновидностей кислородной разделительной резки.

Скоростная кислородная резка достигается за счет наклона резака на 45° в сторону, обратную направлению перемещения. Скорость резки листовой стали толщиной 3—20 мм повышается в 2—3 раза, но ухудшается качество реза.

Высококачественная скоростная кислородная резка (смыв-процесс) позволяет увеличить и скорость (в 1,5—2,5 раза), и качество резки. Первое достигается за счет острого угла наклона резака—25°, второе — применением специальных мундштуков, имеющих три отверстия для режущего кислорода, расположенных по углам равнобедренного треугольника. Впереди перемещается основная режущая струя, которая осуществляет резку металла на всю толщину. Две другие струи, расположенные по бокам и сзади основной, «защищают» горячие кромки, образованные основной струей. Недостатком способа с острым углом атаки является невозможность фигурных резов и большая ширина реза.

Резка кислородом высокого давления до 5 МПа обеспечивает увеличение скорости резки металла толщиной до 50 мм на 30—50%.

Основные параметры кислородной разделительной резки:

характеристики подогревающего пламени — мощность, горючий газ, соотношение смеси горючего газа и кислорода;

характеристики струи режущего кислорода — давление, расход, форма, чистота, скорость резки.

Подогревающее пламя имеет при резке нейтральный характер ($\beta=1,1$ для ацетилена, $\beta=3,5$ для пропан-бутановой смеси). Мощность подогревающего пламени увеличивают с увеличением толщины разрезаемого металла.

Кислородно-флюсовая резка. Для резки хромистых, хромоникелевых нержавеющей сталей, чугуна и цветных металлов, которые не удовлетворяют условиям кислородной резки, применяют способ кислородно-флюсовой резки, сущность которого заключается в том, что в зону реза вместе с режущим кислородом вводится специальный порошкообразный флюс, при сгорании которого выделяется дополнительное тепло и повышается температура в зоне реза. Кроме того, продукты сгорания флюса, взаимодействуя с тугоплавкими окислами, образуют жидкотекучие шлаки, которые легко удаляются из зоны реза, не препятствуя нормальному протеканию процесса.

Основным компонентом порошкообразных флюсов, применяемых при резке металлов, является железный порошок.

Установки для кислородно-флюсовой резки состоят из двух основных частей: резака (ручного или машинного) и флюсопитателя, обеспечивающего подачу и регулирование расхода флюса.

Поверхностная резка металла. Поверхностной кислородной резкой называется процесс снятия кислородной струей слоя металла. В этом случае струя кислорода направлена к поверхности обработки над острым углом 15—40°, но в отличие от разделительной резки направление струи совпадает с направлением резки и металл, расположенный впереди резака, нагревается перемещающимся нагретым шлаком (рис. 61).

Резка кислородным копьем (рис. 62). Резку кислородным копьем выполняют тонкостенной стальной трубкой (копьем) с наружным диаметром 20—35 мм. Трубку подсоединяют к рукоятке с вентиля-

для кислорода и по ней подают кислород к месту реза. До начала резки конец трубки нагревают газовой горелкой или электрической дугой до температуры воспламенения. Кислородное копые горящим концом прижимают с достаточно большим усилием к изделию (металл, бетон, железобетон) и прожигают таким образом отверстие.

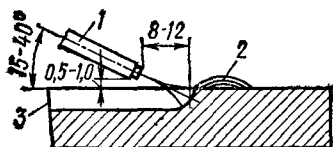


Рис. 61. Схема поверхностной резки:

1 — мундштук, 2 — шлак, 3 — канавка

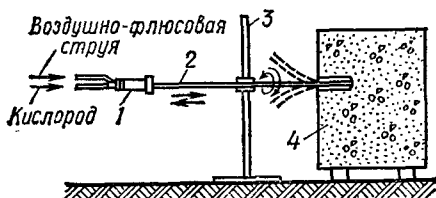


Рис. 62. Схема прожигания отверстия в бетоне кислородным копыем:

1 — держатель копыя, 2 — копые, 3 — защитный экран, 4 — бетонное изделие

Образуемые в процессе прожигания отверстия шлаки давлением кислорода и газов выносятся наружу в зазор между копыем и стеной прожигаемого отверстия. Этому процессу способствуют возвратно-поступательные и вращательные движения копыем.

Контрольные вопросы

1. Для какой цели используют ацетиленовый генератор?
2. Как работает водяной предохранительный затвор?
3. Объясните устройство сварочной газовой горелки.
4. Как устроен газокислородный резак?
5. Назовите основные параметры режима газовой сварки. Как они выбираются?
6. В чем заключается левый и правый способы сварки?
7. В чем заключается сущность кислородной резки?

Глава 13. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

§ 45. Сущность процессов сварки давлением

Основным признаком всех видов сварки давлением (контактная, диффузионная, холодная, трением и др.) является пластическая деформация металла в зоне контакта соединяемых деталей, необходимая для образования сварных соединений. При сварке происходит принудительное образование межатомных связей между кристаллическими решетками соединяемых деталей. Выделяют три основные стадии процесса образования сварного соединения при сварке давлением:

- формирование физического контакта;
- образование химических связей;
- развитие последующих процессов на границе полученного соединения и в объеме деталей.

На первой стадии обеспечивается сближение атомных поверхностей. Устраняются неровности и поверхностные пленки, формируется физический контакт, т. е. такой контакт тел, в котором атомы находятся на расстоянии, достаточном для начала межатомного взаимодействия.

На второй стадии происходит объединение электронных оболочек, возникают химические (для металлов — металлические) связи и образуется сварное соединение.

На третьей стадии через границу соединения начинается взаимная диффузия атомов, развиваются различные сопутствующие сварке процессы, связанные с деформированием металла, его нагревом, со структурными изменениями в зоне соединения и прилегающих участках.

Основными параметрами технологического процесса при сварке давлением являются величина давления (деформация), температура нагрева, время сварки, а также величина и скорость взаимного перемещения свариваемых деталей и среда (состав газовой фазы), в которой происходит сварка.

§ 46. Электрическая контактная сварка

Контактная сварка — основной вид сварки давлением термомеханического класса. Контактная сварка представляет собой процесс образования неразъемных соединений в результате нагрева металла проходящим через контакт электрическим током и пластической деформации зоны соединения под действием сжимающего усилия. Благодаря высокой производительности, надежности соединений, высокому уровню механизации и автоматизации, контактная сварка находит широкое применение в промышленности.

Место соединения при контактной сварке разогревается проходящим по металлу электрическим током (рис. 63). Количество выделяемой теплоты Q (Дж) определяется законом Джоуля — Ленца $Q = I^2 R t$, где I — сварочный ток, А; R — полное сопротивление между электродами сварочной машины, Ом; t — время протекания тока, с.

Сопротивление R увеличивается с увеличением длины l , удельного сопротивления ρ и уменьшением сечения проводника F

$$R = m \frac{\rho l}{F},$$

где $m \leq 1$ — коэффициент поверхностного эффекта, обусловленный неравномерным распределением тока по проводнику.

Полное сопротивление R состоит из сопротивления деталей R_d , сопротивления между электродом и деталью $R_{эд}$ и сопротивления сварочного контакта R_k между деталями, т. е. $R = 2R_d + 2R_{эд} + R_k$.

Сопротивление сварочного контакта R_k является наибольшим, так как поверхности стыка заготовок даже после тщательной обработки имеют микронеровности и соприкасаются только в отдельных точках. Благодаря этому действительное сечение F_k контакта, через которое проходит ток, резко уменьшается, сопротивление резко увеличивается и в зоне контакта возникают большие плотности тока. Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются пленки окислов и загрязнения с малой электропроводностью ρ , которые также увеличивают сопротивление R_k . Увеличение температуры в зоне контакта, увеличивая ρ , дополнительно способствует увеличению R_k в процессе сварки.

В результате высокой плотности тока в точках контакта металл нагревается до термопластического состояния или до оплавления. При непрерывном сдавливании нагретых деталей образуются новые точки соприкосновения и так до тех пор, пока не произойдет полное сближение до межатомных расстояний, т. е. сварка.

Основными способами контактной сварки являются стыковая, точечная и шовная.

Стыковая контактная сварка — вид контактной сварки, при которой соединение свариваемых частей происходит по всей площади стыкуемых поверхностей (рис. 64).

При стыковой сварке свариваемые заготовки 1 закрепляют в зажимах стыковой машины. Один из зажимов 2 — подвижный, другой — неподвижный. Питание электрическим током производят от сварочного трансформатора 3, вторичная обмотка которого соединена с плитами гибкими шинами, а первичная питается от сети переменного тока через включающее устройство. При помощи механизма осадки подвижная плита перемещается, свариваемые детали сжимаются под усилием P .

Различают стыковую сварку сопротивлением (рис. 64, а) и оплавлением (рис. 64, б). Сваркой с о п р о т и в л е н и е м называется стыковая сварка с разогревом стыка до пластического состояния и последующей осадкой. Сваркой о п л а в л е н и е м называется стыковая сварка с разогревом стыка до оплавления и последующей осадкой. Различают сварку непрерывным и прерывистым (импульсным) оплавлением, а также оплавлением с подогревом.

Параметрами режима контактной сварки являются ток I (А) и его плотность j (А/мм²), усилие сжатия свариваемых деталей P (Па), время протекания тока t (с), установочная длина L (мм). Установочной длиной называют расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки.

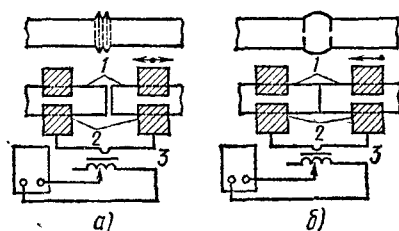


Рис. 64. Контактная стыковая сварка
а — сопротивлением, б — оплавлением;
1 — детали, 2 — зажимы, 3 — сварочный трансформатор

Для правильного формирования сварного соединения и высоких механических свойств соединения необходимо, чтобы процесс протекал в определенной последовательности. Совместное графическое изображение изменения параметров при сварке называется *циклограммой* сварки.

Цикл контактной стыковой сварки представлен на рис. 65.

При сварке сопротивлением чисто обработанные поверхности свариваемых деталей приводят в соприкосновение, плотно сжимают,

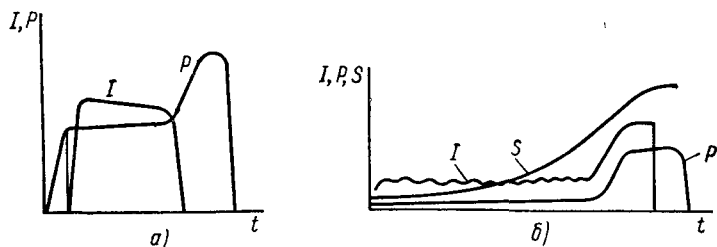


Рис. 65. Циклограммы контактной сварки:

а — сопротивлением, б — оплавлением, I — сварочный ток, P — усилие сжатия, S — перемещение подвижной плиты, t — время

затем включают сварочный ток. Протекание тока через детали приводит к постепенному нагреву металла в стыке до температуры, близкой к температуре плавления. Затем увеличивают усилие (осаживают детали). При этом происходит пластическая деформация металла в стыке и образование соединения в твердом состоянии. При сварке сопротивлением не обеспечивается достаточно полное удаление окисных пленок, трудно добиться равномерного нагрева деталей по всему сечению, поэтому сварка сопротивлением используется ограничительно для изделий относительно небольшого сечения (до 200—250 мм²).

При сварке непрерывным оплавлением детали сближают при включенном сварочном токе и очень малом усилии. Детали соприкасаются вначале по отдельным небольшим площадкам, через которые проходит ток высокой плотности, вызывающий оплавление деталей в результате непрерывного образования и разрушения контактов — перемычек между их торцами. В результате оплавления на торце образуется слой жидкого металла, который при осадке вместе с загрязнениями и окисными пленками выдавливается из стыка. Соединение образуется в твердом состоянии.

При прерывистом оплавлении зажатые заготовки сближают под током с медленно нарастающей скоростью при возвратно-поступательном движении. Импульсное оплавление локализует нагрев и расширяет высокотемпературную зону, предупреждая этим быструю кристаллизацию расплава. После оплавления всего сечения выключают ток и осаживают заготовки. Импульсное оплавление уменьшает требуемую для оплавления мощность в 10—15 раз и припуск на оплавление в 4—5 раз.

Сварка оплавлением находит применение при создании разнообразных конструкций как малых, так и больших сечений (до 100 000 мм²). Наиболее типичными изделиями, свариваемыми стыковой сваркой, являются элементы трубчатых конструкций, колеса, кольца, рельсы, железобетонная арматура и др.

Для защиты металла от взаимодействия с газами при стыковой сварке химически активных металлов используют защитные среды (инертные газы).

Серьезной проблемой стыковой сварки является необходимость удаления грата — металла, выдавленного осадкой. Грат зачищают вручную или механическими устройствами-гратоснимателями сразу после сварки, после охлаждения соединения или после термообработки.

Точечная сварка — вид контактной сварки, при которой детали соединяют по отдельным участкам касания (рис. 66). По количеству одновременно свариваемых точек точечная сварка

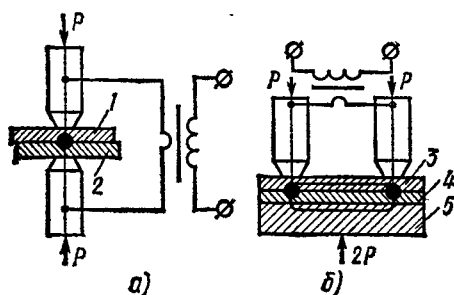


Рис. 66. Схема контактной точечной сварки:

а — двусторонней, б — односторонней

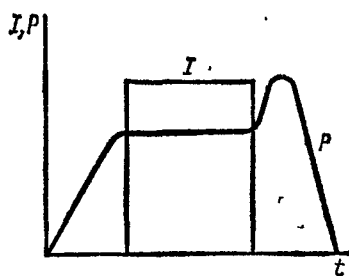


Рис. 67. Циклограмма точечной сварки:

I — сварочный ток, P — усилие сжатия, t — время

может быть одно-, двух- и многоточечной. При точечной сварке детали собирают внахлестку, зажимают между электродами, связанными со сварочным трансформатором, при включении которого детали нагреваются кратковременным (0,01—0,5 с) импульсом тока до появления расплавленной зоны в месте контакта деталей или ядра точки. Усилие после выключения тока сохраняется некоторое время для того, чтобы кристаллизация расплавленного металла точки проходила под давлением, что предотвращает усадочные дефекты — трещины и рыхлоты. Точечная сварка в зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым деталям может быть двусторонней и односторонней. При двусторонней сварке (рис. 66, а) две или большее число заготовок 1 и 2 сжимают между электродами точечной машины. При односторонней сварке (рис. 66, б) ток распределяется между верхним и нижним листами 3 и 4, причем нагрев осуществляется током, протекающим через нижний лист. Для увеличения этого тока предусматривается токопроводящая медная подкладка 5. Односторонней сваркой можно соединять детали одновременно двумя точками.

Параметрами режима точечной сварки являются: усилие сжатия, плотность тока и время протекания тока. Одна из циклограмм точечной сварки показана на рис. 67. Весь цикл сварки состоит из следующих стадий:

сжатие свариваемых деталей между электродами;

включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления с образованием литого ядра точки;

выключение тока и увеличение усилия сжатия для улучшения структуры сварной точки;

снятие усилия с электродов.

Точечную сварку проводят на мягких и жестких режимах:

Мягкий режим характеризуется относительно малой плотностью тока ($70\text{--}160\text{ А/мм}^2$), большой длительностью цикла ($0,5\text{--}3\text{ с}$) при сравнительно малом давлении ($15\text{--}40\text{ МПа}$).

Жесткий режим характеризуется большими плотностями тока ($160\text{--}360\text{ А/мм}^2$), большими давлениями (до 150 МПа) и малой длительностью цикла сварки ($0,2\text{--}1,5\text{ с}$).

Мягкие режимы применяют преимущественно при сварке углеродистых и низколегированных сталей, жесткие — коррозионно-стойких сталей, алюминиевых и медных сплавов.

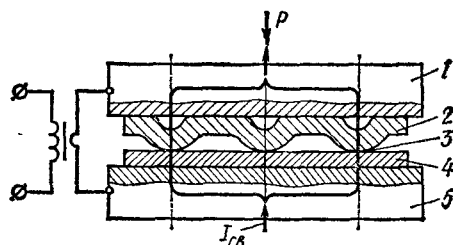


Рис. 68. Схема рельефной сварки

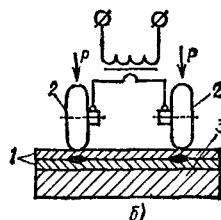
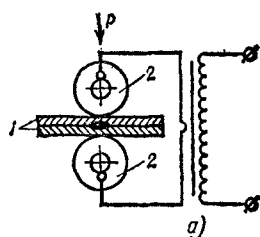


Рис. 69. Схема шовной сварки:

a — двусторонняя, *б* — односторонняя; 1 — заготовки, 2 — электроды, 3 — медная подкладка

Разновидностью точечной сварки является рельефная сварка (рис. 68), когда первоначальный контакт деталей происходит по заранее подготовленным выступам (рельефам). При рельефной сварке заготовки 2 и 4 зажимают между плоскими электродами 5 и 1. В начальный период сварки наличие рельефа 3 дает возможность обеспечить концентрированный нагрев в месте контакта при больших плотностях тока. В дальнейшем рельефы постепенно деформируются и на определенной стадии происходит плавление и образование ядра точки.

Шовная сварка — вид контактной сварки, при которой происходит образование непрерывного соединения (шва) последо-

вательным перекрытием точек друг друга. При этом образуется прочное и плотное соединение. При шовной сварке электроды выполняют в виде вращающихся дисковых электродов — роликов, с помощью которых происходит передача усилия деталям, подвод тока и перемещение деталей (рис. 69). Как и при точечной сварке, детали обычно собирают внахлестку и нагревают током без применения специальных средств защиты нагреваемого металла от взаимодействия с атмосферой. Шовную сварку, так же, как и точечную, можно выполнять при одностороннем и двустороннем положении электродов (роликов).

На практике применяют следующие способы шовной сварки: непрерывную, прерывистую с непрерывным вращением роликов, прерывистую с периодическим вращением роликов.

Непрерывную шовную сварку выполняют сплошным швом при постоянном давлении роликов на свариваемые детали и постоянно включенном сварочном токе в течение всего процесса сварки. Недостатками способа являются повышенные требования к подготовке поверхности, однородности, толщины и химического состава металла свариваемых деталей.

Прерывистую сварку с непрерывным вращением роликов также выполняют при постоянном давлении сжатия, а сварочный ток подают периодически, при этом шов формируется в виде сварных точек, перекрывающихся друг друга. Шов получается более высокого качества.

При прерывистой сварке с периодическим вращением роликов сварочная цепь замыкается в момент остановки роликов (шаговая сварка). Такой способ обеспечивает наиболее качественный шов, так как формирование сварной точки происходит под сжимающим давлением. Однако машины для такого способа сварки отличаются большей сложностью и меньшей производительностью.

Циклограммы шовной сварки с непрерывным и прерывистым включением тока показаны на рис. 70.

Шовную сварку применяют в массовом производстве при изготовлении емкостных изделий с толщиной стенки 0,3—3 мм, где требуются герметичные швы.

Конденсаторная сварка. Недостатком контактной сварки является значительная кратковременная мощность, потребляемая из сети в момент сварки, что создает тяжелые условия для питающей сети.

Разработаны способы сварки запасенной энергией, которая накапливается в каком-либо приемнике, а затем через сварочный трансформатор или непосредственно кратковременно расходуется

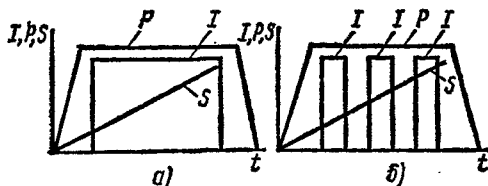


Рис. 70. Циклограммы шовной сварки:
a — непрерывное, *б* — импульсное включение тока,
I — сварочный ток, *P* — давление, *S* — перемещение роликов, *t* — время

на сварку. После цикла сварки идет процесс накопления энергии и снова сварка.

Существуют четыре вида запасенной для сварки энергии: электростатическая или конденсаторная, электромагнитная, инерционная и аккумуляторная. Энергия соответственно накапливается в батарее конденсаторов, магнитном поле специального сварочного трансформатора, вращающихся частях генератора или аккумуляторной батарее.

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

$$A = \frac{CU^2}{2},$$

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

Существуют два вида конденсаторной сварки: бестрансформаторная, когда конденсаторы разряжаются непосредственно на свариваемые детали, и трансформаторная, когда конденсатор разряжается на первичную обмотку сварочного трансформатора, во вторичной цепи которого находятся предварительно сжатые свариваемые заготовки. Бестрансформаторная конденсаторная сварка предназначена в основном для сварки встык, трансформаторная — для точечной и шовной, но может быть использована и для стыковой. Преимуществами конденсаторной сварки являются: точная дозировка количества энергии, не зависящая от внешних условий, в частности, от напряжения в сети, малое время протекания тока (0,001—0,0001 с) при высокой плотности тока, обеспечивающее малую зону термического влияния; возможность сварки материалов очень малых толщин (до нескольких микрон); невысокая потребляемая мощность (0,2—2 кВ·А). Конденсаторную сварку применяют главным образом в приборостроении.

§ 47. Оборудование для контактной сварки

Контактную сварку выполняют на специальных машинах, электрическая часть которых состоит из сварочного трансформатора, прерывателя сварочного тока, регулятора (или переключателя) тока первичной цепи трансформатора и токоподводящих устройств, а механическая часть — из механизмов и узлов, создающих необходимое давление для сжатия свариваемых деталей. В зависимости от типа выполняемого соединения контактные машины подразделяют на стыковые, точечные и шовные.

Контактные машины работают на переменном токе от трансформаторов. Первичную обмотку трансформаторов подключают к сети с напряжением 220—380 В, ее изготавливают секционной для изменения числа рабочих витков при переключении ступеней мощности.

Вторичная обмотка трансформатора состоит из одного или двух витков (вторичное напряжение 1—12 В.) Сила вторичного тока — 1000—100 000 А.

При изменении числа витков первичной обмотки изменяется коэффициент трансформации

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

где W_1 и W_2 — число витков первичной и вторичной обмоток; U_1 и U_2 — соответственно первичное и вторичное напряжение обмотки. Вторичное напряжение

$$U_2 = \frac{U_1 W_2}{W_1},$$

где $W_2=1$, U_1 — величина постоянная.

Таким образом, для изменения U_2 необходимо изменять число включенных витков первичной обмотки W_1 , соответственно будет изменяться и вторичный сварочный ток. Для увеличения вторичного тока необходимо уменьшить число витков первичной обмотки трансформатора.

Контактные машины включают и выключают со стороны первичной обмотки трансформатора. В процессе сварки необходимо периодически включать и выключать ток. Для этого применяют прерыватели нескольких типов: простые механические контакторы, электромагнитные (синхронные и асинхронные), электронные приборы (тиatronные и игнитронные).

Механические контакторы применяют главным образом на стыковых и точечных машинах неавтоматического действия небольшой мощности, электромагнитные контакторы — для стыковой, точечной и шовной сварки на машинах малой и средней мощности.

Электронные прерыватели обеспечивают синхронные включение и выключение тока со строго определенной продолжительностью импульсов и пауз, их применяют для всех типов контактных машин автоматического действия.

Механизмы давления служат для сжатия заготовок между электродами машины. В зависимости от типа привода механизмы сжатия могут иметь пружинный, электромеханический, пневматический, пневмогидравлический, гидравлический приводы, а также ручной, который иногда применяют в стыковых и точечных машинах малой мощности.

Машины для стыковой сварки выпускают мощностью 0,8—800 кВ·А (МС-403 МС-502, МСМУ-150 и др.) Стыковые машины мощностью до 25 кВ·А применяют для сварки сопротивлением: 25—250 кВ·А — сопротивлением и оплавлением, 150—800 кВ·А — автоматической сварки оплавлением изделий с большим поперечным сечением.

Машины для точечной сварки (МТ-601, МТ-1220, МТ-1616, МТ-4001, МТВ-8002, МТВ-16002, МТК-1601 и др.) выпускают мощ-

ностью 0,1—250 кВ·А. Точечные машины мощностью 0,1—25 кВ·А применяют для сварки деталей толщиной 0,1—2 мм.

Машины для шовной сварки (МШ-1001, МШ-1601, МШ-2001 и др.) в отличие от точечной снабжены механизмом привода роликовых электродов и особым скользящим токоподводом. Шовные машины выпускают мощностью 25—200 кВ·А.

Машины для конденсаторной сварки состоят из батареи конденсаторов, выпрямительных устройств, сварочного трансформатора (при трансформаторной сварке), выключателя сварочного тока, вспомогательных устройств и сварочного стола. В зависимости от типа свариваемого соединения выпускают точечные, шовные и стыковые конденсаторные машины, которые могут быть универсальными (автоматические и полуавтоматические) и специализированными.

§ 48. Некоторые специальные виды сварки давлением

Контактную сварку проводят, как правило, с расплавленным металлом в зоне контакта. Значительная группа видов сварки давлением осуществляется без расплавления металла контактных поверхностей. Эти виды сварки делятся по степени подогрева — с подогревом и без подогрева, степени силового воздействия — с низкоинтенсивным силовым воздействием и высокоинтенсивным силовым воздействием. Сварку давлением с подогревом выполняют, как правило, с низкоинтенсивным силовым воздействием. Сюда относятся: диффузионная, термокомпрессионная, газопрессовая и другие виды сварки.

Сварку давлением без подогрева выполняют, как правило, с высокоинтенсивным силовым воздействием. К этим видам относятся: сварка взрывом, холодная, магнитно-импульсная и др. Ультразвуковая сварка относится к сварке без подогрева при низкоинтенсивном внешнем силовом воздействии. Параметры этих видов сварки (давление, температура нагрева, время нагрева, удельное давление, интенсивность приложения давления и температуры) зависят от свойств соединяемых материалов, состояния их поверхности и конструктивных особенностей и т. д.

Д и ф ф у з и о н н а я с в а р к а осуществляется в результате взаимной диффузии атомов контактирующих частей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации.

Основные параметры диффузионной сварки — температура нагрева, давление, время нагрева, среда, в которой проводят сварку.

Температура для однородных металлов, как правило, должна составлять 0,5—0,8 температуры плавления металла или сплава, а при сварке разнородных — 0,5—0,7 температуры более легкоплавкого металла. Такая температура ускоряет взаимную диффузию атомов материалов через поверхность стыка и облегчает снятие неровностей поверхности и пластическое деформирование металла.

Нагрев осуществляется преимущественно индукционными токами, можно использовать и другие источники нагрева: обычные

сопротивления, электрический ток, пропускаемый по самим деталям, электронный луч и др.

Давление в контакте соединяемых деталей в зависимости от температуры и рода свариваемых материалов может меняться от 3—5 до 100 МПа. Осадку деталей осуществляют главным образом пневматическими системами. Время сварки составляет от нескольких до десятков минут. Сварку выполняют в условиях безокислительного нагрева, для этого в сварочной камере поддерживается разрежение 10^{-1} — 10^{-3} Па.

Особым видом диффузионной сварки является сварка в контролируемой атмосфере, при которой в качестве защитных газов используют водород, аргон, гелий.

Схема диффузионной сварки и циклограмма процесса показаны на рис. 71. Установка для диффузионной сварки состоит из вакуумной камеры, в которой выполняют сварку, специальных насосов для создания вакуума, нагревательного устройства с источником питания и устройства для передачи давления.

После откачки воздуха включают нагревательное устройство, начинается нагрев детали до заданной температуры с обеспечением равномерного нагрева деталей по всему сечению. После выравнивания температуры прикладывают усилие сжатия, которое в процессе сварки поддерживают постоянным. При охлаждении свариваемых деталей нагрузку снимают не сразу, а при температурах 100—400°C, чтобы предупредить разрушение соединения из-за различных коэффициентов термической усадки соединяемых элементов.

Преимуществами диффузионной сварки являются возможность сварки разнородных материалов, получение равнопрочных соединений без заметного изменения физико-химических свойств, отсутствие присадочных материалов, высокое качество защиты.

Холодная сварка — сварка, при которой соединение образуется при значительной пластической деформации без внешнего нагрева соединяемых поверхностей. Физическая сущность процесса заключается в сближении за счет пластической деформации свариваемых поверхностей до образования металлических связей между ними и получения таким образом прочного сварного соединения. Отличительной особенностью холодной сварки является необходимость значительной объемной пластической деформации и малой степени ее локализации в зоне контакта соединяемых материалов. Это связано с необходимостью разрушения и удаления окисных пленок из зоны контакта механическим путем, т. е. за счет интенсивной совместной деформации. Большое усилие сжатия обеспечивает разрыв окисных пленок, их дробление и образование чистых поверхностей, способных к схватыванию.

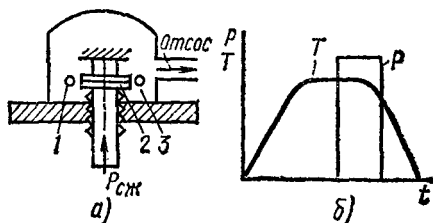


Рис. 71. Диффузионная сварка:

a — схема сварки, 1 — нагреватель, 2 — заготовки, 3 — камера, б — циклограмма сварки, *P* — усилие сжатия, *T* — температура, *t* — время

Свариваемость металлов при холодной сварке зависит от их пластичности и качества подготовки поверхности. Чем пластичнее металлы, ровнее и чище их поверхности, тем качественнее они свариваются. Хорошо свариваются пластичные сплавы алюминия, меди, никеля, серебра, золота и подобные металлы и сплавы в однородных и разнородных сочетаниях. В недостаточно пластичных металлах при больших деформациях могут образовываться трещины. Высокопрочные металлы и сплавы холодной сваркой не свариваются.

Наиболее широкое применение холодная сварка нашла в производстве изделий домашнего обихода из алюминия и его сплавов.

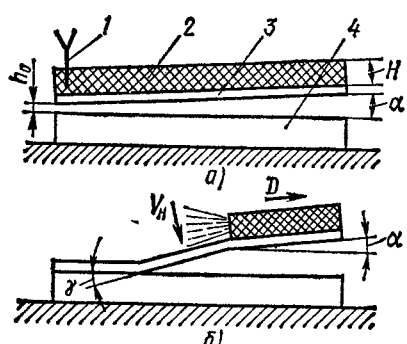


Рис. 72. Принципиальная схема сварки взрывом:

а — перед сваркой, б — во время сварки

в электротехнической промышленности и транспорте для соединения медных и алюминиевых проводов. Холодной сваркой выполняют точечные, шовные, ступенчатые и фланцевые соединения. Для холодной сварки используют стандартное прессовое и прокатное оборудование, которое снабжают специальным инструментом в соответствии со свариваемыми деталями, применяют также специализированные машины. Холодной сваркой соединяют металлы и сплавы толщиной 0,2—15 мм. Главными характеристиками процесса являются давление

и величина деформации. В зависимости от состава и толщины свариваемого металла давление составляет 150—1000 МПа, степень относительной деформации 50—90%.

Разновидностью сварки давлением, близкой по физической сущности к холодной сварке, является термокомпрессионная сварка, которая отличается от холодной сварки тем, что места соединения подогревают до температур, ниже температур образования жидких фаз, а затем сжимают. Основными параметрами процесса являются усилие сжатия, температура подогрева и продолжительность выдержки.

Сварка взрывом — сварка, при которой соединение образуется за счет совместной пластической деформации в результате вызванного взрывом соударения быстро движущихся деталей. Кинетическая энергия соударения соединяемых частей затрачивается на работу совместной пластической деформации контактирующих слоев металла, приводящей к образованию сварного соединения. При этом часть работы пластической деформации переходит в тепло, которое может разогревать металл в зоне соединения до высоких температур, вплоть до оплавления локальных объемов.

Большинство видов сварки взрывом основано на использовании направленного (кумулятивного) взрыва (рис. 72). Соединяемые поверхности двух заготовок 3 и 4 (в простейшем случае пластины)

одна из которых (4) неподвижна и является основанием, располагают параллельно или под углом α друг к другу на расстоянии h_0 . На подвижную (метаемую) заготовку 3 кладут ВВ — взрывчатое вещество 2 толщиной H , а со стороны, находящейся над вершиной угла, устанавливают детонатор 1. При возбуждении с помощью детонатора заряда ВВ по нему распространяется фронт детонационной волны со скоростью детонации D , составляющей 2000—8000 м/с (детонация — процесс разложения взрывчатого вещества с выделением газов и тепла). Образующиеся позади фронта детонации газообразные продукты взрыва в начальный период создают давление 100—200 ГПа, сохраняя в течение короткого времени по инерции прежний объем ВВ, а затем со скоростью 0,50—0,75 D расширяются, сообщая находящемуся под ними участку металла импульс движения. Под действием этого импульса объемы заготовки последовательно вовлекаются в ускоренное движение к поверхности неподвижной части металла и с большой скоростью соударяются с ней. При установившемся процессе метаемая пластинка на некоторой длине дважды перегибается, ее наклонный участок под углом γ движется со скоростью D за фронтом детонационной волны. При соударении из вершины угла выносятся тонкие поверхностные слои, окислы и загрязнения. Высокоскоростное соударение метаемой части металла с неподвижной пластиной вызывает течение металла в их поверхностных слоях. Поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил сцепления и происходит схватывание по всей площади соединения с характерной волнообразной границей раздела соединяемых деталей. Продолжительность сварки взрывом не превышает несколько микросекунд. Прочность соединений, выполненных сваркой взрывом, выше прочности соединяемых материалов. Это объясняется упрочнением тонких слоев металла, прилегающих к соединенным поверхностям, при их пластической деформации.

Сварку взрывом используют при изготовлении заготовок биметалла, для плакирования поверхностей конструкционных сталей металлами и сплавами с особыми физическими и химическими свойствами, при сварке заготовок из разнородных материалов.

Разновидностью сварки взрывом является магнитно-импульсная сварка соударением свариваемых деталей обеспечивается импульсным магнитным полем от разряда батарей конденсаторов. Длительности импульса и скорости соударения при этом способе близки к сварке взрывом. Преимуществом магнитно-импульсной сварки по сравнению со сваркой взрывом является более легкое управление параметрами процесса.

Сварка трением — сварка, при которой используется давление, кратковременный нагрев и взаимное перемещение свариваемых поверхностей. Отличительные особенности процесса: нагрев сжатых деталей осуществляется в результате трения соединяемых поверхностей при их вращении или возвратно-поступательном перемещении друг относительно друга, при этом механи-

ческая энергия непосредственно переходит в тепловую в месте стыка;

строго локализованное тепловыделение в приповерхностных слоях свариваемых деталей;

сварка происходит в твердом состоянии без расплавления металла свариваемых деталей;

сварное соединение образуется в результате совместной пластической деформации при нагреве и сжатии за счет возникновения

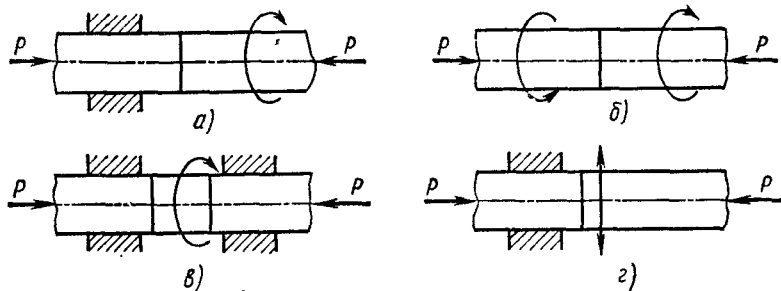


Рис. 73. Схема сварки трением:

a — при вращении одной детали, *б* — при вращении обеих деталей, *в* — при неподвижных деталях с вращающейся вставкой, *г* — при возвратно-поступательном движении одной детали

металлических связей между чистыми контактирующими поверхностями свариваемых деталей; окисные пленки, имеющиеся на металлических поверхностях в месте соединения, разрушаются в результате трения и удаляются за счет пластической деформации в радиальном направлении.

Принципиальные схемы сварки трением показаны на рис. 7. Простейшая и наиболее распространенная схема процесса показана на рис. 73, *a*. Две детали, подлежащие сварке, устанавливаются соосно в зажимах машины; одна из них — неподвижна, другая приводится во вращение вокруг их общей оси. На сопряженных торцевых поверхностях деталей, прижатых одна к другой осевым усилием P , возникают силы трения. Работа, затрачиваемая при вращении на преодоление этих сил трения, преобразуется в тепло, которое выделяется на поверхностях трения и нагревает прилегающие к ним тонкие слои металла до температур, необходимых для образования сварного соединения (1000—1300°C — при сварке черметаллов). Нагрев прекращается при быстром (практически мгновенном) прекращении относительного вращения. Подготовленный таким образом к сварке металл подвергают сильному сжатию проковке, в результате образуется прочное сварное соединение.

Основными параметрами процесса сварки трением являются: скорость вращения свариваемых деталей, величина осевого усилия при нагреве и проковке, величина осадки при нагреве, длительность приложения усилия проковки. Преимуществами сварки трением являются высокая производительность процесса, малые затраты энергии (в 5—10 раз меньше, чем при стыковой контактной сварке).

высокое качество сварных соединений; возможность сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях, простота механизации и автоматизации.

Недостатками сварки трением являются неуниверсальность процесса, с ее помощью можно сваривать такие пары деталей, из которых хотя бы одна должна быть телом вращения; громоздкость оборудования; наличие грата после сварки.

Сварку трением применяют для соединения деталей встык (стержней, труб) и для образования Т-образных соединений. В промышленном производстве сварку трением используют для соединения деталей сечением 50—10 000 мм² из одноименных и ряда разноименных конструкционных материалов.

Для сварки трением применяют универсальные и специализированные машины, имеющие зажимы для свариваемых деталей, механизм сжатия и привод вращения, выпускают серийные машины типа МСТ — МСТ-23, МСТ-35, МСТ-41 и др.

Ультразвуковая сварка — сварка, при которой

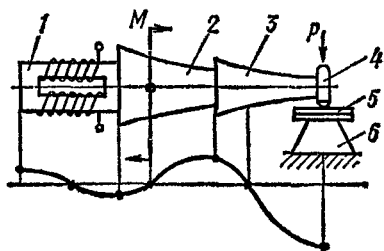


Рис. 74. Схема ультразвуковой сварки

неразъемное соединение образуется при совместном воздействии на свариваемые детали механических колебаний высокой (ультразвуковой) частоты и относительно небольших сдвливающих усилий. Сварка осуществляется в результате взаимного трения свариваемых поверхностей, нагрева и давления. Силы трения возникают при действии на заготовки, сжатые осевой силой, механических колебаний ультразвуковой частоты (20—30 кГц). Для получения такой частоты используют магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении размеров некоторых металлов, сплавов и керамических материалов под действием переменного магнитного поля.

Машины для ультразвуковой сварки состоят из источника питания, аппаратуры управления, механической колебательной системы и привода давления.

На рис. 74 показана простейшая схема ультразвуковой сварки. Свариваемые заготовки 5 помещают на опоре 6. Наконечник 3 соединен с магнитострикционным преобразователем 1 через трансформатор 2, представляющих вместе с рабочим инструментом 4 волновод (на рис. 74 показано, как изменяется амплитуда колебаний по длине волновода). Ультразвук излучается непрерывно в процессе сварки. Элементом колебательной системы, возбуждающей упругие колебания, является электромеханический преобразователь 1, использующий магнитострикционный эффект. Переменное напряжение создает в обмотке преобразователя намагничивающий ток, который возбуждает переменное магнитное поле в материале преобразователя. При изменении величины напряженности магнитного поля в материале возникает периодическое из-

менение размеров, при этом частота упругих колебаний равна двойной частоте тока. Амплитуда колебаний на конце волновода составляет на холостом ходу $\sim 20-40$ мкм. Сварка происходит под действием трения, вызванного микроскопическим возвратно-послательным перемещением частиц на трущихся поверхностях.

Таким образом, в результате ультразвуковых колебаний в твёрдых слоях контактирующих поверхностей создаются сдвиговые формации, разрушающие поверхностные пленки. По мере разрушения пленок образуются узлы схватывания, приповерхностные слои металла нагреваются, немного размягчаются и под действием сжимающего усилия пластически деформируются, свариваемые поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил, возникает прочное сварное соединение.

Сравнительно небольшое тепловое воздействие на свариваемые металлы обеспечивает минимальное изменение их структуры и свойств. Например, для меди температура в зоне контакта не превышает 600°C , при сварке алюминия — $200-300^{\circ}\text{C}$.

Параметрами ультразвуковой сварки являются мощность генератора колебаний, давление сварки, амплитуда колебаний и время сварки. Ультразвуковую сварку применяют для получения точечных и шовных соединений металлов и сплавов небольшой толщины (как правило, менее 1 мм) и для сварки пластмасс.

Преимущества ультразвуковой сварки:

сварка в твердом состоянии без существенного нагрева свариваемых деталей, что дает возможность сваривать химически активные материалы и сплавы, образующие хрупкие соединения;

возможность сварки и приварки тонких и ультратонких деталей;

применение небольших сдавливающих усилий $0,1-2,5$ кН. вследствие чего деформации в месте соединения незначительны (вмятины 5—10%);

малая мощность сварочного оборудования и несложность его конструкции.

Недостатком ультразвуковой сварки является ограниченность толщин свариваемых деталей (менее 1 мм), большая стоимость генераторов высокой частоты, действие высокой частоты на организм человека.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сварки давлением?
2. Как происходит образование соединения при контактной сварке?
3. Из каких основных узлов состоят контактные машины?
4. В чем заключается сущность диффузионной сварки?
5. Как производится холодная сварка?
6. Как образуется сварное соединение при сварке взрывом?
7. В чем заключается сущность сварки трением?
8. В чем заключается сущность ультразвуковой сварки?

Часть III

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОИЗВОДСТВО СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Глава 14. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА

§ 49. Классификация сталей

Сталью называется сплав железа с углеродом, содержащий менее 2% углерода.

По назначению стали разделяются на следующие группы: конструкционные, которые используются в машиностроении, строительстве, судостроении и т. д.; легированные со специальными свойствами; инструментальные.

По химическому составу различают стали углеродистые и легированные. Содержание углерода в конструкционных углеродистых сталях составляет 0,06—0,9%. Углерод является основным легирующим элементом сталей этой группы и определяет механические свойства и свариваемость их. В зависимости от содержания углерода конструкционные углеродистые стали могут быть низкоуглеродистые ($C \leq 0,25\%$), среднеуглеродистые ($C = 0,26 \div 0,45\%$), высокоуглеродистые ($C = 0,46 \div 0,76\%$). По качественному признаку различают углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—71) и качественные (ГОСТ 1050—74). Качественные стали имеют пониженное содержание вредных примесей (серы). Примером низкоуглеродистой стали обыкновенного качества, широко используемой в сварных конструкциях, является сталь БСтЗ, содержащая 0,14—0,22% С, 0,40—0,65% Мп, 0,12—0,30% Si, с пределом прочности $\sigma_B = 380 \div 490$ МПа и относительным удлинением $\delta = 23 \div 26\%$. В качестве примера углеродистой качественной стали можно назвать сталь 20, содержащую 0,17—0,24% С, 0,35—0,65% Мп, 0,17—0,37% Si, с пределом прочности $\sigma_B = 420$ МПа и относительным удлинением $\delta = 26\%$.

Легированными называются стали, содержащие специально введенные элементы для придания стали определенных свойств и структуры.

В зависимости от содержания легирующих элементов легированные конструкционные стали разделяют на следующие группы:

низколегированные, в которых содержание одного легирующего элемента не превышает 2%, а суммарное содержание легирующих элементов менее 2,5—4%;

среднелегированные, в которых содержание одного легирующего элемента составляет 2—5%, при суммарном содержании 2,5—10%;

высоколегированные, в которых содержание легирующих элементов составляет более 10%.

По назначению различают легированные стали: конструкционные повышенной прочности, жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие.

В зависимости от вводимых в сталь легирующих элементов различают стали марганцевые, кремнемарганцевые, хромокремнемарганцевые, хромоникелевые и т. д.

По содержанию углерода легированные стали, как и углеродистые, могут быть низко-, средне- и высокоуглеродистыми. В зависимости от структуры сталей после охлаждения на воздухе с высоких температур различают стали перлитного, ферритного, аустенитного, мартенситного, карбидного и промежуточных классов.

§ 50. Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Стали этих групп относятся к хорошо сваривающимся практически всеми видами сварки сталям.

Основные требования при их сварке: обеспечение равнопрочности сварного соединения основному металлу; отсутствие дефектов; требуемая форма сварного шва и соединения; производительность и экономичность.

При сварке плавлением эти требования обеспечиваются выбором и применением типовых сварочных материалов, режимов и техники сварки.

Особенностями сварки низколегированных низкоуглеродистых сталей по сравнению с нелегированными низкоуглеродистыми являются большая их склонность к перегреву, росту зерна, образованию закалочных структур, возможное разупрочнение, когда свариваются термоупрочненные стали.

Поэтому при сварке низколегированных сталей к параметрам режима сварки предъявляются более жесткие требования, чем при сварке нелегированной низкоуглеродистой стали. Сварка ограничивается более узкими пределами режимов, чтобы одновременно обеспечить минимальное количество закалочных структур и уменьшить перегрев.

Ручную дуговую сварку покрытыми электродами низкоуглеродистых сталей выполняют электродами типа Э38 (для неответственных конструкций), Э42, Э42А, Э46 с кислыми, рutilовыми, целлюлозными и основными покрытиями марок СМ-5, АНО-2, ОЗС-3, МР-3, ВСЦ-1, УОНИ-13/45 и др. Низколегированные низкоуглеродистые стали сваривают электродами типов Э42А, Э50А, Э50 с основным покрытием марок УОНИ-13/45, СМ-11, УОНИ-13/55 и др.

Для сварки этих сталей под флюсом в основном применяют марганцевые высококремнистые флюсы (АН-348А, ОСЦ-45) и низкоуглеродистые сварочные проволоки Св-08, Св-08А, Св-08ГА (для низкоуглеродистых сталей), Св-08ГА, Св-10Г2, Св-08ХН, Св-08ХМФА и др. (для сварки низколегированных сталей).

При сварке в защитных газах используют углекислый газ, а также смеси углекислого газа с аргоном и кислородом, в качестве

сварочных проволок применяют в этом случае проволоки марок Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС, для повышения коррозионной стойкости используют проволоку марки Св-08ХГ2С.

Газовую сварку применяют при изготовлении неотчетственных конструкций из низкоуглеродистой стали. В качестве присадки используют проволоки марок Св-08, Св-08А.

Точечной и шовной сваркой сваривают металл толщиной 0,05—6 мм; основной вид соединения — нахлесточное. Режим сварки выбирают в зависимости от свойств и толщины металла.

Сварка низколегированных низкоуглеродистых теплоустойчивых сталей. К этой группе относятся стали, легированные молибденом и вольфрамом для обеспечения жаропрочности при температурах 450—585°C: 15М, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФ и др.

Эти стали чувствительны к термическому циклу при сварке, следствием которого является появление холодных трещин, процессы старения, разупрочнения, охрупчивания и опасность локальных трещин при эксплуатации. Основными мерами борьбы с этими процессами являются:

применение основного металла с минимальным содержанием примесей и пониженным содержанием углерода;

обеспечение близкого химического состава шва и основного металла;

сварка с предварительным подогревом, для сталей 12ХМ, 15ХМ—200—250°C, для сталей 20ХМФ, 15Х1М1Ф — 350—450°C;

выбор рационального режима сварки;

термообработка после сварки.

Основной способ сварки — ручная дуговая покрытыми электродами с фтористокальциевым покрытием типа Э-МХ (для хромомолибденовых сталей) и Э-ХМФ (для хромомолибденовольфрамовых сталей) на постоянном токе обратной полярности. Применяют также сварку в углекислом газе и под флюсом с использованием сварочных проволок, легированных элементами, входящими в состав свариваемых сталей.

§ 51. Сварка легированных и углеродистых закаливающих сталей

К сталям, интенсивно закаливающимся при сварке с образованием мартенситной и промежуточных структур, относятся следующие группы сталей:

конструкционные низко- и среднелегированные среднеуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,5%. Эти стали отличаются высокой прочностью ($\sigma_B = 600—2000$ МПа) в сочетании с удовлетворительной пластичностью за счет комплексного легирования. К ним относятся стали перлитного класса 35Х, 40Х, 35Г2, 50Г2, 30ХГТ, 30ХГСА, 35ХГСНА и мартенситного класса 33ХЗНВФМА, 30Х2НМФА и др.;

жаропрочные и жаростойкие стали 15Х5, 15Х5МА, 15Х5ВФ, 20Х3МВФ, 30ХМА, 38ХМЮА, 25Х1М1Ф и др.;

средне- и высокоуглеродистые стали 30, 35, 40, 45, 50, 60, 25Г, 35Г, 45Г.

Высокоуглеродистые стали в сварных конструкциях, как правило, не используют. Необходимость их сварки возникает при наплавке и ремонте.

Характерными общими трудностями при сварке этих сталей являются:

образование закалочных структур при охлаждении после сварки и в связи с этим склонность к холодным трещинам;

опасность образования горячих трещин;

разупрочнение металла сварочного соединения по сравнению с основным металлом.

В зависимости от степени легирования и содержания углерода эти стали относятся к удовлетворительно, ограниченно или плохо свариваемым сталям (см. табл. 2). Главная трудность при сварке этих сталей — образование закалочных структур и холодных трещин, поэтому основные металлургические и технологические меры по обеспечению качества сварных соединений основываются на устранении этой трудности и являются общими для большинства рассматриваемых сталей.

Основные меры по обеспечению качественного сварного соединения. До сварки и при составлении технологии главное внимание должно быть уделено рациональному выбору материалов: основного и присадочного металла, защитных средств. Основной металл с пониженным содержанием углерода и примесей (серы, фосфора) обладает более высокой стойкостью против холодных и горячих трещин.

Для повышения пластичности сварного шва и увеличения сопротивляемости трещинам содержание углерода в присадочном металле должно быть менее 0,15%; целесообразно предусмотреть более широкую разделку кромок, чтобы обеспечить формирование шва в основном за счет более пластичного присадочного металла. Высокая технологическая прочность сварного шва достигается при ограничении содержания легирующих элементов в присадочной проволоке до следующих пределов, %: 0,15 С; 0,5 Si; 1,5 Mn; 1,5 Gr; 2,5 Ni; 0,5 V; 1,0 Mg; 0,5 Nb.

В качестве защитных средств необходимо использовать покрытия и флюсы основного типа, а также инертные газы (для легированных сталей). Для уменьшения сварочных напряжений, являющихся одной из причин образования трещин, необходимо при конструировании избегать жестких узлов, скоплений швов, пересекающихся и близко расположенных швов.

Во время сварки предусматриваются следующие технологические меры:

1. Тщательная подготовка и сборка под сварку, минимальное смещение кромок (менее 10—15% толщины), минимальный зазор, качественные прихватки и зачистка кромок;

2. Регулирование термического цикла сварки для обеспечения требуемой скорости охлаждения шва и зоны термического влияния.

Скорость охлаждения регулируют изменением режимов сварки (величина тока, скорость сварки, погонная энергия), применением специальных технологических приемов (сварка короткими и длинными участками, наложение отжигающего валика, сварка горкой, каскадом и др.) и применением подогрева, который может быть предварительным, сопутствующим и последующим.

Подогрев является наиболее радикальным способом регулирования скорости охлаждения и его используют, когда регулированием режимов сварки и специальными технологическими приемами не удается обеспечить требуемую скорость охлаждения и структуру сварного соединения. Чем выше содержание углерода и легирующих элементов, тем выше температура подогрева.

3. Уменьшение содержания водорода в сварном шве, так как водород является одной из главных причин образования холодных трещин. Это достигается применением электродов с фтористо-кальциевыми покрытиями и основных флюсов, защитных газов с пониженной влажностью; сваркой на постоянном токе обратной полярности; тщательной подготовкой под сварку свариваемого и присадочного металла (зачистка, обезвоживание) и защитных материалов (сушка, прокатка).

4. Рациональная последовательность наложения швов с целью уменьшения остаточных напряжений и деформаций.

После сварки для предотвращения холодных трещин производят незамедлительно высокий отпуск для снятия остаточных напряжений и стабилизации структуры.

Для обеспечения равнопрочности сварного соединения после сварки производят полную термообработку изделия, которая заключается в закалке и последующем высоком отпуске или в нормализации.

Если габариты изделия и имеющееся оборудование допускают полную термообработку, то химический состав металла шва должен быть близок химическому составу основного металла.

Если полная термообработка невозможна, то проблема равнопрочности (обычно для сталей $\sigma_B < 700-750$ МПа) решается подбором режимов сварки и легированием через присадочную проволоку.

При сварке закаливающихся сталей применяют в основном виды сварки плавлением — ручную дуговую, под флюсом, в защитных газах, электронно-лучевую, электрошлаковую с использованием сварочных материалов, обеспечивающих заданную прочность и химический состав сварного шва.

§ 52. Сварка высоколегированных сталей

К высоколегированным сталям условно отнесены стали, содержание железа в которых более 45%, а суммарное содержание легирующих элементов не менее 10%, при содержании одного из элементов не менее 8%.

В зависимости от основных свойств стали и сплавы подразделяют на группы:

коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали и сплавы, обладающие стойкостью против различных видов коррозии;

жаростойкие (окалиностойкие), обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550°C , работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;

жаропрочные, способные работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

В зависимости от структуры, полученной при охлаждении после высокотемпературного нагрева, стали разделяют на классы — мартенситный, ферритный, аустенитный и др.

Наиболее широкое применение находят коррозионно-стойкие хромоникелевые стали (12X18H10T, 10X23H18 и др.). Главными трудностями при сварке этих сталей являются склонность к горячим трещинам при сварке и к межкристаллитной коррозии при эксплуатации.

Стойкость к образованию горячих трещин связана с образованием крупнозернистой транскристаллитной структуры металла шва, высокой литейной усадки кристаллизующегося металла и значительных деформаций при затвердевании.

Основными мерами борьбы с горячими трещинами в этих сталях являются:

получение сварных швов с двухфазной структурой (аустенит плюс небольшое количество феррита, карбидов или боридов) для улучшения структуры и измельчения зерна;

ограничение вредных примесей;

применение неокислительных основных электродных покрытий и фторидных флюсов;

уменьшение объема сварочной ванны и отношения ширины шва к глубине проплавления для уменьшения усадочных деформаций при сварке (сварка на пониженных погонных энергиях, рациональная разделка кромок, ниточные швы).

К межкристаллитной коррозии склонны высоколегированные стали всех классов, имеющие высокое содержание хрома, вследствие выпадения под действием нагрева карбидов хрома по границам зерен, обеднения границ зерен хромом и из-за этого пониженной стойкости границ против коррозии. Опасность межкристаллитной коррозии возникает при нагреве хромоникелевых сталей аустенитного и аустенитно-ферритного классов до температур $500\text{—}850^{\circ}\text{C}$, при нагреве высокохромистых сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного классов до температур свыше 950°C .

Исходя из причин межкристаллитной коррозии, основные меры борьбы с ней направлены на предотвращение образования карбидов хрома и выпадения их по границам зерен. С этой целью применяют:

ограничение содержания углерода в стали и присадочной про-

волоке (при содержании углерода менее 0,02—0,05% межкристаллитная коррозия исключается);

легирование сталей титаном, ниобием, танталом, цирконием, ванадием, которые более активно взаимодействуют с углеродом в стали и препятствуют образованию карбидов хрома;

получение двухфазной структуры в хромоникелевых сталях (содержание феррита до 20—25%) дополнительным легированием основного металла и проволоки хромом, кремнием, алюминием, ванадием, молибденом, бором;

стабилизирующая термообработка, закалка после сварки или отжиг с целью выравнивания содержания хрома на границах и в теле зерна;

технологические меры — сварка при минимальном тепловложении, применение дополнительного охлаждения, заварка последнего валика со стороны среды, уменьшение разбрызгивания, предотвращение ударов, забоин и т. д.

Технологические особенности сварки высоколегированных сталей связаны с их физическими свойствами и системой легирования. Пониженная теплопроводность и большое электрическое сопротивление (примерно в 5 раз больше, чем у углеродистых сталей) способствуют большей скорости плавления металла, большей глубине проплавления и коэффициенту наплавки, поэтому для сварки высоколегированных сталей требуются меньшие токи и погонные энергии по сравнению с углеродистыми, укороченные электроды при ручной сварке, меньше вылет электрода и больше скорость подачи проволоки при механизированной сварке.

Пониженная теплопроводность и большой коэффициент линейного расширения способствуют более сильному короблению по сравнению с углеродистыми сталями. Легирование влияет на вязкость металла и коэффициент поверхностного натяжения, для большинства высоколегированных сталей шов формируется хуже, чем для углеродистых.

Для предотвращения угара легирующих элементов и защиты от взаимодействия с воздухом предъявляются дополнительные требования — сварка в инертной среде, применение безокислительных покрытий и флюсов, сварка короткими дугами, лучшие результаты обеспечивает механизированная сварка.

Технологии сварки выбирают с учетом основного показателя свариваемости и эксплуатационных требований.

Виды сварки высоколегированных сталей. Для сварки высоколегированных сталей используют ручную дуговую сварку покрытыми электродами, механизированную и ручную в защитных газах, сварку под флюсом, электрошлаковую, лучевые виды сварки, контактную и ряд других.

Ручную дуговую сварку покрытыми электродами выполняют на пониженных по сравнению со сваркой углеродистых сталей токах [$I_{св} = (15 \div 35)d_э$], на постоянном токе обратной полярности, ниточными валиками без поперечных колебаний, короткой дугой. Используют электроды с основным покрытием со стержнем из про-

волоки, соответствующей марке свариваемой стали с учетом главного показателя свариваемости и эксплуатационных требований. Например, при сварке кислотостойкой хромоникелевой стали 12X18H10T для предотвращения образования горячих трещин и межкристаллитной коррозии используют электроды типа Э-04Х20Н9 (электрод марки ЦЛ-11), типа Э-02Х19Н9Б (электрод марки ОЗЛ-7), обеспечивающие в шве аустенитно-ферритную структуру: аустенит плюс 2,5—7% феррита.

Сварку под флюсом используют для соединения металла толщиной 3—50 мм. По сравнению со сваркой углеродистых сталей при сварке высоколегированных сталей в 1,5—2 раза уменьшается вылет электрода, применяют электроды диаметром 2—3 мм, сварка многопроходная, на постоянном токе обратной полярности с использованием безокислительных низкокремнистых фтористых и высокоосновных флюсов (АНФ-14, АНФ-16, К-8, АН-26). Серьезным преимуществом сварки под флюсом по сравнению с ручной, наряду с повышением производительности сварки и качества сварных соединений, является уменьшение затрат на разделку кромок.

Сварку в защитных газах проводят в инертных газах неплавящимся и плавящимся электродом непрерывно горящими и импульсными дугами. Аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом широко используют при сварке толщин менее 7 мм и для сварки корневых швов. Сварку в защитных газах плавящимся электродом выполняют в аргоне, а также в смесях аргона с гелием, применяют также смеси аргона с кислородом и углекислым газом. В отдельных случаях допускается сварка в углекислом газе при отсутствии опасности межкристаллитной коррозии.

Сварку плавящимся электродом проводят на токах, обеспечивающих струйный перенос металла.

Большинство высоколегированных сталей хорошо свариваются контактной сваркой. Низкая тепло- и электропроводность аустенитных сталей вызывает необходимость применения более жестких режимов, чем для низколегированных сталей. Повышенная прочность сталей требует увеличения усилия сжатия электродов при сварке. Сварные соединения, выполненные на оптимальном режиме, имеют высокие прочностные характеристики.

§ 53. Сварка чугуна

Чугунами называются сплавы железа с углеродом при содержании углерода более 2%. Машиностроительные чугуны обладают хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью, прочностью, малой чувствительностью к концентраторам напряжения.

В зависимости от формы графита в сплаве различают следующие виды чугунов: белые, серые, высокопрочные, ковкие.

В белом чугуне весь углерод находится в виде химического соединения углерода с железом — цементита Fe_3C , который придает чугуну высокую твердость и хрупкость. Поэтому в конструкциях белый чугун не используют.

Основным конструкционным материалом является серый чугун, в котором углерод находится в несвязанном состоянии в пластинчатой форме. Помимо углерода (3,2—3,8%) в сером чугуне обычно присутствуют кремний (1—5%) и марганец (0,5—0,8%).

В маркировке серого чугуна указывается его прочность при растяжении и изгибе. Например, СЧ 18—36 означает: серый чугун (СЧ) с прочностью на растяжение 180 МПа и прочностью на изгиб 360 МПа.

В высокопрочных чугунах графит имеет шаровидную форму за счет модифицирования чугуна магнием, вследствие чего улучшаются пластические свойства чугуна. В маркировке высокопрочного чугуна указываются прочность и относительное удлинение при растяжении. Например, ВЧ 40—10 означает: высокопрочный чугун, имеющий предел прочности при растяжении 400 МПа и относительное удлинение 10%.

В ковких чугунах углерод также находится в свободном состоянии, но имеет хлопьевидную форму за счет длительного отжига (томления) при высокой температуре (20—25 ч при 950—1000°C). Маркируют ковкий чугун как высокопрочный. Например, КЧ 30—6 означает: ковкий чугун с пределом прочности при растяжении 300 МПа и относительным удлинением 6%.

Свариваемость и свойства сварных соединений зависят от структуры чугуна. Структура определяется составом чугуна и технологическими факторами, главным из которых является скорость охлаждения с высоких температур. Главный процесс, формирующий структуру, — это процесс графитизации, т. е. процесс выделения углерода в чугуне. Процесс графитизации при сварке является благоприятным, так как выделение углерода в свободном состоянии уменьшает хрупкость чугуна. Все элементы, содержащиеся в чугуне, делятся на две группы:

способствующие графитизации (графитизаторы) — С, Si, Al, Ni, Co, Cu;

задерживающие графитизацию (отбеливающие), т. е. способствующие выделению углерода в виде цементита (Fe_3C) и охрупчиванию чугуна — S, V, Cr, Sn, Mo, Mn.

Основными металлургическими трудностями при сварке чугуна являются:

охрупчивание сварного шва и зоны термического влияния в связи с отбеливанием при охлаждении после сварки;

склонность к образованию холодных трещин в связи с образованием хрупких структур и наличием высоких сварочных напряжений;

пористость в связи с интенсивным газовыделением при сварке.

К технологическим трудностям относятся:

повышенная жидкотекучесть чугуна, что затрудняет удержание расплавленного металла шва от вытекания, поэтому сварку чугуна проводят в нижнем положении с формовкой сварочной ванны, дополнительно сварку осложняет отсутствие пластического состояния перед переходом из твердого в жидкое состояние;

образование на поверхности расплавленного металла тугоплавких окислов (SiO_2 и др.), которые затрудняют формирование шва, способствуют появлению непроваров;

большая разнородность чугуна по составу и структуре, что сказывается на различной свариваемости и свойствах различных участков свариваемой детали.

Главными трудностями являются охрупчивание металла при сварке и холодные трещины. Поэтому технология сварки чугуна строится, исходя из этих факторов. Для борьбы с охрупчиванием холодными трещинами применяют подогрев металла, используют присадочные материалы, обеспечивающие структуру серого чугуна за счет легирования графитизаторами, а также используют специальные электроды с медью и никелем.

В зависимости от температуры подогрева сварку чугуна разделяют на следующие виды:

горячая — подогрев до $600\text{--}700^\circ\text{C}$;

полугорячая — подогрев до $300\text{--}400^\circ\text{C}$;

холодная без предварительного подогрева.

Наилучшие результаты (отсутствие хрупких структур и трещин, хорошие свойства соединения) дает горячая сварка.

Технология горячей сварки включает в себя следующие операции: подготовку под сварку, предварительный подогрев, сварку, последующее медленное охлаждение изделия. При горячей сварке чугуна используют следующие виды сварки: газовую, ручную дуговую, полуавтоматическую, порошковой проволокой.

Для газовой сварки используют нормальное пламя горелки и флюсы на основе буры, которые обеспечивают защиту расплавленного металла от воздуха и разжижают образующиеся окислы, облегчая сплавление. В качестве присадки используют чугунные прутки марки А диаметром 4, 6, 8, 12 мм.

Ручную дуговую сварку выполняют плавящимися покрытыми и угольными электродами. Для сварки плавящимся электродом используют чугунные электроды (ОМЧ-1, ВЧ-3, Станколит, ЭП4 и др.), которые состоят из чугунного стержня марок А или Б (ГОСТ 2671-70), содержащих углерод (3—3,5%), кремний (3—4%), марганец (0,5—0,8%) и стабилизирующие покрытия с добавкой графитизаторов. Сварку ведут на повышенных токах $I_{\text{св}} = (60 \div 100)d_e$ с использованием специальных электрододержателей. Используют электроды диаметром d_e до 12 мм. Сварку угольным электродом проводят электродами диаметром 8—20 мм с использованием присадочных чугунных прутков марок А и Б и флюса на основе буры.

Наряду с ручной применяют полуавтоматическую горячую сварку чугуна порошковой проволокой типа ППЧ-3, содержащей 4,5—5% С, 5,3—4,0% Si, 0,1—0,3% Al, 0,1—0,3% Ti.

Недостатками горячей сварки чугуна являются усложнение технологии, связанной с подогревом, и тяжелые условия работы сварщиков.

При холодной, а также полугорячей сварке чугуна требуются специальные меры, чтобы получить соединение без трещин и хрупких зон. К этим мерам относятся следующие:

применение электродных материалов с повышенным содержанием графитизаторов (C, Si), а также модификаторов, чтобы получить структуру серого чугуна. Эти элементы вводят в металл шва через электродный стержень (когда используют чугунные прутки), покрытие (когда используют стальные прутки) или через наполнение порошковой проволоки;

применение электродов, обеспечивающих получение в металле шва пластичной структуры из цветных и специальных сплавов. Для этой цели используют сплавы на основе меди и никеля, которые не образуют соединений с углеродом, уменьшают его растворимость, способствуют графитизации, уменьшают отбеливание в шве. Используют железомедные, железоникелевые и медноникелевые электроды. Электроды обычно составные — стержень из цветного металла, железо вводят в виде оплетки, дополнительного стержня или порошка в покрытие. Содержание железа в металле шва обычно не должно превышать 10—15%;

сварка на минимальном тепловложении для того, чтобы уменьшить зону остаточных деформаций и напряжений и структурных изменений. Для этого применяют электроды малых диаметров 3—4 мм, малый ток $I_{св} = (20 \div 25)d_э$, сварку короткими участками 15—25 мм, проковку шва после сварки.

Применяют также другие специальные меры, например сварку со стальными шпильками для получения прочного механосварного соединения, низкотемпературную газовую пайку-сварку. Она отличается от обычных способов тем, что основной металл не доводят до температуры плавления, а нагревают только до температуры 820—860°C, т. е. до температуры «смачиваемости».

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются углеродистые стали?
2. Каковы особенности сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей?
3. Какая главная трудность возникает при сварке легированных и углеродистых закаливающихся сталей?
4. Как классифицируются высоколегированные стали?
5. Какие трудности возникают при сварке высоколегированных сталей?
6. Какие трудности возникают при сварке чугуна?

Глава 15. СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

§ 54. Общие сведения

По своим физико-химическим свойствам многие цветные металлы резко отличаются от стали, что необходимо учитывать при выборе вида и технологии сварки. По химической активности, температурам плавления и кипения, теплопроводности, плотности, механическим характеристикам, от которых зависит свариваемость, цветные металлы можно условно разделить на такие группы:
легкие (алюминий, магний, бериллий);

активные и тугоплавкие (титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден, вольфрам);
тяжелые (медь, никель, свинец);
драгоценные (золото, серебро, платина).

Одной из характерных особенностей большинства цветных металлов является их высокая химическая активность, сродство к газам воздуха и склонность к окислению, что приводит к резкому ухудшению свойств сварных соединений, вызывает поры и трещины. Поэтому при сварке цветных металлов необходима более качественная защита (инертный газ, вакуум, специальные флюсы) по сравнению со сваркой черных металлов и более качественная подготовка под сварку.

Второй характерной особенностью цветных металлов является их высокая чувствительность к сварочному нагреву, которая проявляется в образовании крупнокристаллической структуры шва, росте зерна в околошовной зоне, а для термически упрочняемых сплавов в неблагоприятных структурных изменениях с образованием охрупчивающих выделений и последующем старении металла, что приводит к существенному изменению свойств по сравнению с основным металлом.

Поэтому при сварке цветных металлов необходимо более тщательное соблюдение рекомендуемых режимов сварки.

Для некоторых цветных металлов и их сплавов характерна высокая склонность к горячим трещинам в связи с большой усадкой кристаллизующегося металла, образованием грубокристаллической структуры и наличием примесей (алюминиевые, магниевые, никелевые сплавы).

Одним из характерных дефектов является также пористость, связанная преимущественно с насыщением сварного соединения водородом вследствие различной растворимости газов в твердом и жидком состояниях, перемещения водорода из основного металла в зону сварки, реакций взаимодействия с примесями. Отмеченные обстоятельства требуют очень высокой культуры производства при сварке цветных металлов и их сплавов.

§ 55. Сварка алюминия и его сплавов

Алюминий обладает малой плотностью, хорошей тепло- и электропроводностью, высокой коррозионной стойкостью и пластичностью. В технике алюминий применяют в виде алюминия разной степени чистоты и в виде сплавов.

В зависимости от содержания примесей (Fe, Si, Cu, Zn, Ti) алюминий бывает особой чистоты А999 (0,001% примесей), высокой чистоты А995, А99, А97, А95 (0,005—0,5% примесей) и технической чистоты А85, А8 и др. (0,15—1,0% примесей). Технический алюминий, выпускаемый в виде деформируемого полуфабриката (листы, профили, прутки и др.), используют в сварных конструкциях, маркируется АД0 и АД1.

Из-за низкой прочности ($\sigma_B = 80 \div 110$ МПа) алюминий применяют для ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется легкость, свариваемость, пластичность, коррозионная стойкость (рамы, двери, трубопроводы, емкости, фольга и др.). Для нагруженных изделий используют сплавы алюминия. В качестве основных легирующих элементов алюминиевых сплавов применяют Cu, Mg, Si, Mn, Zn, реже — Li, Ni, Ti, Be, Zr.

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления, способности к термической обработке и свойствам. В зависимости от технологии изготовления различают деформируемые (для полуфабрикатов и изделий обработкой давлением), литейные (для отливок) и спеченные сплавы. По способности к термической обработке они разделяются на термические неупрочняемые и термические упрочняемые.

К литейным сплавам относятся сплавы системы Al—Mg, Al—Si, Al—Cu. Наиболее распространенными литейными сплавами с повышенным содержанием кремния (от 4 до 13%) являются силумины. Сварку литейных сплавов выполняют при ремонтных работах.

Материалы из спеченной алюминиевой пудры (САП) и спеченных алюминиевых сплавов (САС) состоят из порошков алюминия или его сплавов и окиси алюминия. Получают САП и САС последовательным брикетированием, спеканием и прессованием окисленной с поверхности алюминиевой пудры. Эти материалы свариваются очень плохо.

Сварные конструкции изготовляют из деформируемых алюминиевых сплавов. К деформируемым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относятся алюминированный марганцевый сплав АМц(Al+1,3%Mn) и группа сплавов системы Al—Mg (магналий): АМг, АМг1, АМг2, АМг3, АМг5В, АМг6. Эти сплавы обладают хорошей свариваемостью, в сварных соединениях они способны сохранять до 95% прочности основного металла при высокой пластичности и высокой коррозионной стойкости.

К деформируемым термически упрочняемым сплавам относятся сплавы систем: Al — Cu — Mg — Mn (дуралюмины), Al — Mg — Si и Al — Cu — Mg — Si (авиали) и др.

Большинство термически упрочняемых алюминиевых сплавов обладают ограниченной свариваемостью.

Основные трудности при сварке алюминия и его сплавов:

1. Сильная окисляемость при высоких температурах с образованием тугоплавкой ($T_{пл} = 2200^\circ\text{C}$) окисной пленки Al_2O_3 , имеющей большую плотность по сравнению с алюминием ($\rho = 3,85$ г/см³). Окисная пленка затрудняет сплавление, способствует непроварам и охрупчивает металл. Поэтому окисную пленку удаляют со свариваемых кромок механическими и химическими способами перед сваркой, во время сварки защищают зону сварки инертным газом, катодным распылением, применяют покрытия и флюсы на основе солей щелочных и щелочноземельных металлов (NaCl, NaF, KCl и др.).

2. Склонность к образованию горячих трещин в связи с большой литейной усадкой кристаллизующегося металла, грубой столбчатой структурой сварного шва и наличием примесей. Для борьбы с горячими трещинами ограничивают содержание примесей в свариваемом металле, для измельчения структуры добавляют в металл и сварочную проволоку модификаторы (Zr, Ti, В), регулируют режимы сварки.

3. Термически упрочняемые сплавы весьма чувствительны к термическому циклу сварки в связи с ростом зерна, распадом перенасыщенных твердых растворов, процессами старения, рекристаллизацией.

4. Для ряда сплавов, особенно содержащих в качестве основного легирующего элемента магний, характерна повышенная пористость при сварке, связанная с насыщением расплавленного металла водородом. Для уменьшения пористости рекомендуется тщательная подготовка свариваемых кромок и проволоки перед сваркой для удаления следов влаги с их поверхности; тщательная защита сварочной ванны, увеличение диаметра присадочной проволоки, чтобы уменьшить удельную поверхность присадки; предварительный подогрев, чтобы увеличить время существования сварочной ванны и чтобы пузырьки водорода успели выйти из ванны.

5. Высокие теплопроводность и теплоемкость алюминия требуют применения мощных источников тепла, а в ряде случаев подогрева. Высокий коэффициент линейного расширения и малый модуль упругости способствуют появлению значительных сварочных деформаций, что требует применения надежных зажимных приспособлений и устранения деформаций после сварки в ответственных конструкциях. В алюминии отсутствует пластическое состояние при нагреве и переходе из твердого в жидкое состояние, при этом алюминий не меняет своего цвета, а в области температур более 400—450°C имеется провал прочности и пластичности, поэтому рекомендуется сварка на подкладках.

Высокий коэффициент вязкости и быстрый теплоотвод затрудняют формирование шва, поэтому требуется соблюдение необходимых разделок кромок. Все перечисленные трудности и особенности сварки алюминия требуют тщательной подготовки под сварку и тщательное соблюдение технологии сварки.

Способы сварки алюминия и его сплавов. Основными способами сварки алюминия и его термонеупрочняемых сплавов являются сварка в инертных газах, по флюсу и под флюсом, ручная покрытыми электродами, контактная. Используют также газовую сварку, электрошлаковую сварку угольным электродом. Для термически упрочняемых сплавов применяют преимущественно механизированные способы сварки в инертных газах, электронно-лучевую, плазменно-дуговую.

Сварку в инертных газах проводят в аргоне, гелии и их смеси неплавящимся и плавящимся электродом. Сварку вольфрамовым электродом (обычно толщины ≤ 12 мм) выполняют на переменном токе. Ориентировочную величину тока выбирают из ра-

счета $I_{св} = (35 \div 50)d_w$, где d_w — диаметр вольфрамового электрода.

Для тонколистового металла целесообразна сварка в импульсном режиме. Для толстолистового металла ($\delta > 10$ мм) хорошие результаты дает трехфазная сварка неплавящимся электродом. Сварку плавящимся электродом в инертных газах выполняют при толщинах более 4 мм на постоянном токе обратной полярности $I_{св} = (120 \div 160)d_s$, где d_s — диаметр сварочной проволоки. Недостатком сварки плавящимся электродом является повышенная пористость.

Ручную дуговую сварку используют при сварке толщин более 4 мм. Основа покрытий электродов — галлоидные соединения щелочных металлов типа: криолит — Na_3AlF_6 — 35%, KCl — 50%, NaCl — 15%. Сварку проводят на постоянном токе обратной полярности на режимах $I_{св} = (45 \div 50)d_s$, где d_s — диаметр электрода 4—8 мм, напряжение на дуге $U_d = 30 \div 34$ В. При толщинах более 10 мм для обеспечения расплавления и качественного формирования необходим подогрев до 100—400°С.

Газовую сварку выполняют нормальным пламенем с использованием защитного флюса в виде порошка или пасты, наносимого на свариваемые кромки и присадочной проволоки типа АФ-4А (KCl —50%, LiCl — 14%, NaCl —28%, NaF —8%), с подогревом металла при сварке больших толщин. Ориентировочную мощность сварочного пламени выбирают из расчета расхода ацетилен 75 $\text{дм}^3/\text{ч}$ на 1 мм толщины свариваемого металла.

При использовании флюсовой защиты применяют следующие способы электрической сварки плавлением: дуговую автоматическую по флюсу и под флюсом и электрошлаковую. При сварке по слою флюса используют флюсы на основе солей щелочных и щелочноземельных металлов (например, АН-А1 системы Na_3AlF_6 — KCl — NaCl), которые обладают высокой электропроводностью, поэтому погруженная дуга закорачивается и горит по слою флюса. Дополнительным параметром режима при сварке по слою флюса является высота насыпного слоя флюса перед дугой. Добавление во флюсы для сварки алюминия компонентов, уменьшающих электропроводность флюса, позволило разработать способ сварки под слоем флюса. В качестве такого компонента во флюс ЖА-64 введен кремнезем SiO_2 (система Na_3AlF_6 — KCl — NaCl — SiO_2).

Контактную точечную и шовную сварку применяют для соединения листов и профильного проката преимущественно из деформируемых сплавов. Контактную стыковую сварку выполняют преимущественно методом оплавления. Так как алюминий и его сплавы отличаются высокой тепло- и электропроводностью, то необходимо при электроконтактной сварке, особенно точечной, применение больших токов и мощных машин, для повышения эффективности нагрева целесообразно сваривать при малой длительности импульсов тока.

Пластичные сплавы алюминия хорошо свариваются другими видами сварки термомеханического и механического классов.

§ 56. Сварка меди и ее сплавов

Медь обладает хорошей пластичностью и прочностью, высокими показателями коррозионной стойкости, электро- и теплопроводности и вакуумной плотности. Благодаря этим свойствам медь применяется во многих отраслях промышленности: химической, электротехнической, судостроении и др. В технике используют техническую медь разной степени чистоты: М0, М1, М2, М3, М4 и ее сплавы. Все сплавы на основе меди можно разделить на два типа: латуни (Л) и бронзы (Бр.) **Л а т у н ь** — сплав меди с цинком при содержании цинка более 4%. Применяют латуни простые, легированные только цинком, и специальные латуни, которые кроме цинка содержат и ряд других легирующих компонентов. **Б р о н з ы** представляют собой сплавы меди, содержащие не более 5—6% цинка (обычно менее 4%).

Основными трудностями при сварке меди являются следующие:

1. Легкая окисляемость в расплавленном состоянии. Медь взаимодействует с кислородом по реакции $2\text{Cu} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}$. Закись меди Cu_2O , выпадая по границам зерен, способствует образованию горячих трещин, охрупчиванию и снижению коррозионных свойств.

2. Склонность к образованию горячих трещин при образовании окисла Cu_2O и наличии серы, висмута и других вредных примесей резко охрупчивающих металл.

3. Высокая чувствительность к вредному влиянию водорода. Расплавленная медь хорошо растворяет водород и при наличии в ней закиси меди Cu_2O подвержена «водородной болезни». Сущность водородной болезни состоит в том, что водород, легко проникающий в расплавленную медь, реагирует с кислородом закиси меди с образованием водяных паров по реакции $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. Водяные пары в данных условиях создают в затвердевшем металле большое давление и вызывают появление «волосяных» трещин, которые могут привести к разрушению изделия. Кроме того, водород вызывает пористость сварных соединений в связи с различной растворимостью в расплавленной и твердой меди и образованием водяных паров.

4. Склонность к росту зерна и связанному с этим охрупчиванию под влиянием сварочного нагрева.

5. Наряду с отмеченными имеются еще трудности и особенности, которые необходимо учитывать при сварке; прежде всего обеспечение требуемых эксплуатационных свойств сварных соединений, например коррозионной стойкости, обеспечение электропроводности, равной с основным металлом и др. Дополнительными технологическими трудностями при сварке меди являются высокая теплопроводность, высокий коэффициент линейного расширения, жидкотекучесть.

Способы и технологию сварки выбирают с учетом рассмотренных особенностей и трудностей. Одна из главных задач — не допустить образования и нейтрализовать вредное влияние закиси меди Cu_2O . С этой целью для защиты используют инертный газ, флюсы и по-

крытия, содержащие борные соединения (бура, борный ангидрид, борная кислота) и сварочные проволоки с активными раскислителями, например, широко используют проволоки из бронз Бр. КМцЗ-1, содержащую кремний (~3%), марганец (~1%); МНЖКТ5-1-0,2-0,2, содержащую никель (~5%), железо (~1%), кремний (~0,2%), титан (~0,2%); Бр. Х0,5, содержащую хром (~0,5%), и др.

Основными видами сварки меди являются ручная дуговая покрытыми электродами, автоматическая под флюсом, в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом, газовая. В связи с высокой теплопроводностью меди сварку ведут на повышенных по сравнению со сталью величинах тока. Например, при ручной дуговой сварке покрытыми электродами величина тока выбирается из расчета $I_{св} = (50 \div 60)d_э$, где $d_э$ — диаметр электрода; сварка ведется на постоянном токе с подогревом до 200—250°C. Мощность газового пламени по расходу ацетиленового газа выбирают из расчета для толщин $\delta < 10$ мм $v_{C_2H_2} = 150 \cdot \delta$ л/ч, для $\delta > 10$ мм $v_{C_2H_2} = 200 \cdot \delta$ л/ч с использованием нормального пламени и флюсов на основе буры.

Медь и ее сплавы обладают высокой жидкотекучестью, поэтому сварку проводят в нижнем положении на подкладках.

Медь как металл высокой пластичности хорошо сваривается всеми видами термомеханического класса, кроме контактной. Контактная сварка затруднена в связи с высокой электропроводностью меди и малым переходным электрическим сопротивлением.

Наиболее прогрессивными видами сварки меди считают сварку в защитных газах неплавящимся (для толщин до 2—5 мм) и плавящимся (для больших толщин) электродами. При сварке плавящимся электродом применяют аргон, гелий, азот и их смеси с небольшими добавками кислорода. Например, He+(1—2)% O₂, Ar+(2—4)% O₂ и N₂+(4—6)% O₂ или N₂(25—32)% + O₂(4—6)% + Ar(72—68)%.

Основные трудности и особенности сварки медных сплавов те же, что при сварке меди. Дополнительными особенностями являются следующие:

тепловложение (величина сварочного тока) уменьшается по сравнению со сваркой меди в связи с меньшей теплопроводностью сплавов по сравнению с чистой медью;

присадочная проволока выбирается в соответствии с маркой сплава;

сплавы, как правило, более склонны к структурным изменениям; специфические особенности.

Специфическая особенность при сварке латуней заключается в том, что в процессе сварки цинк, содержащийся в латуни, значительно испаряется и сгорает, так как температура испарения цинка ($T_{исп} = 906^\circ\text{C}$) близка к температуре плавления латуни ($T_{пл} = 905^\circ\text{C}$). Поэтому снижается содержание цинка в металле шва и ухудшаются механические свойства соединения. Кроме того, пары цинка ядовиты. Для уменьшения выгорания цинка целесообразны сварка на пониженной мощности, применение присадочного металла, содержащего кремний (кремний создает на поверхности расплавлен-

ного металла защитную окисную пленку SiO_2 , препятствующую испарению цинка), использование защитных флюсов, при газовой сварке целесообразно пламя с пониженным содержанием ацетилена ($\beta = 1,3 \div 1,4$).

Специфической трудностью при сварке бронз является их повышенная жидкотекучесть. При сварке бронз, содержащих алюминий, возникают трудности, связанные с образованием окисла алюминия Al_2O_3 , поэтому методы и технику сварки выбирают такие же, как и при сварке алюминия, а режимы — характерные для медных сплавов.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности сварки цветных металлов и их сплавов?
2. Какие трудности возникают при сварке алюминия и его сплавов?
3. Какие способы сварки применяют при сварке алюминия?
4. Какие трудности возникают при сварке меди?
5. Каковы особенности сварки латуни и бронзы по сравнению с медью?

Глава 16. МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

§ 57. Технологический процесс изготовления сварных конструкций и нормирование сварки

Процесс изготовления сварных конструкций состоит из следующих взаимосвязанных производственных процессов: заготовительных (раскрой, резка и гибка металла,ковка, штамповка, отливка заготовок), обрабатывающих (строжка, сверление, вальцовка, термическая обработка), сборочно-сварочных (сборка, сварка отдельных деталей, узлов и конструкции в целом) и отделочных (правка, окраска, маркировка).

Общая длительность изготовления сварной конструкции складывается из длительности основных операций (заготовительных, обрабатывающих, сборочных, сварочных, отделочных), вспомогательных (контрольных, транспортных) и дополнительного времени (проживание деталей между операциями и др.).

Норма времени T на основные операции (резка, сборка, сварка) складывается из пяти элементов: подготовительного времени t_n , основного t_o , вспомогательного t_b , дополнительного t_d и заключительного времени t_a , т. е. $T = t_n + t_o + t_b + t_d + t_a$.

Подготовительное время выделяется на получение рабочим задания, подготовку и наладку оборудования и приспособлений. Основное (машинное) время — время выполнения непосредственно основной операции (время горения дуги, резки). Вспомогательное время включает время на смену электродов, очистку кромок и швов, их осмотр, клеймение, переходы на другую позицию и т. д.

Дополнительное время предусматривается на обслуживание рабочего места, отдых и естественные надобности. Заключительное время расходуется на сдачу работы. При укрупненном нормировании общее

время T обычно определяют через основное время t_0 и коэффициент учета организации труда $K_{\text{уч}}$ по формуле

$$T = \frac{t_0}{K_{\text{уч}}}.$$

Чем выше коэффициент $K_{\text{уч}}$, тем выше организация труда. При ручной сварке $K_{\text{уч}} = 0,25 \div 0,40$, при автоматической $K_{\text{уч}} = 0,60 \div 0,80$, $K_{\text{уч}}$ зависит от условий сварки и организации труда.

Основное время при ручной дуговой сварке (время горения дуги) определяется по выражению для производительности сварки

$$t_0 = \frac{F_n l \gamma}{\alpha_n I_{\text{св}}},$$

где F_n — площадь поперечного сечения наплавленного металла, см^2 ; l — длина шва, см ; γ — удельная плотность наплавленного металла, г/см^3 ($\gamma = 7,85 \text{ г/см}^3$ для стали); α_n — коэффициент наплавки, $\text{г/(А}\cdot\text{ч)}$; $I_{\text{св}}$ — сварочный ток, А ; $F_n l \gamma = G$ — масса наплавленного металла, г .

Основное время t_0 при автоматической однопроходной сварке может быть рассчитано по формуле

$$t_0 = \frac{l_{\text{оп}}}{v_{\text{св}}},$$

где $l_{\text{оп}}$ — протяженность швов данного размера в узле, свариваемых за операцию, м ; $v_{\text{св}}$ — скорость сварки шва данного размера, м/ч .

Замена ручной сварки механизированной и автоматизированной позволяет резко сократить основное время сварки. Например, при сварке стали толщиной 10—12 мм в нижнем положении вручную покрытым электродом можно сварить около 1 погонного метра в час, а при автоматической сварке под флюсом труб такой же толщины достигнута скорость сварки 320 м/ч. На сварку неповоротного стыка трубы диаметром 1420 мм, толщиной стенки 15—17 мм при ручной дуговой сварке затрачивается 8—10 человеко-часов. Сборочно-сварочный комплекс «Север», разработанный институтом электросварки им. Е. О. Патона, производит сборку и сварку (контактная стыковая сварка) за 2,5 мин.

Трудоемкость сварки составляет примерно одну треть общей трудоемкости изготовления сварной конструкции.

Дальнейшее сокращение времени изготовления сварных конструкций, наряду с механизацией и автоматизацией сварки, предусматривается за счет комплексной механизации и автоматизации всех производственных процессов, составляющих технологический цикл изготовления сварной конструкции (заготовительных, обрабатывающих, сборочно-сварочных, отделочных).

§ 58. Сборочные работы и их механизация

Сборка под сварку — это технологическая операция, обеспечивающая подлежащим сварке деталям необходимое взаимное расположение с закреплением их специальными приспособлениями или прихватками.

Сборку выполняют на плите, стеллаже, стенде или в специальном приспособлении, предназначенными для размещения и закрепления собираемого и свариваемого изделия.

Сборочно-сварочная плита — опорное приспособление в виде горизонтальной металлической плиты с пазами; стеллаж — простейшее опорное приспособление с плоской горизонтальной поверхно-

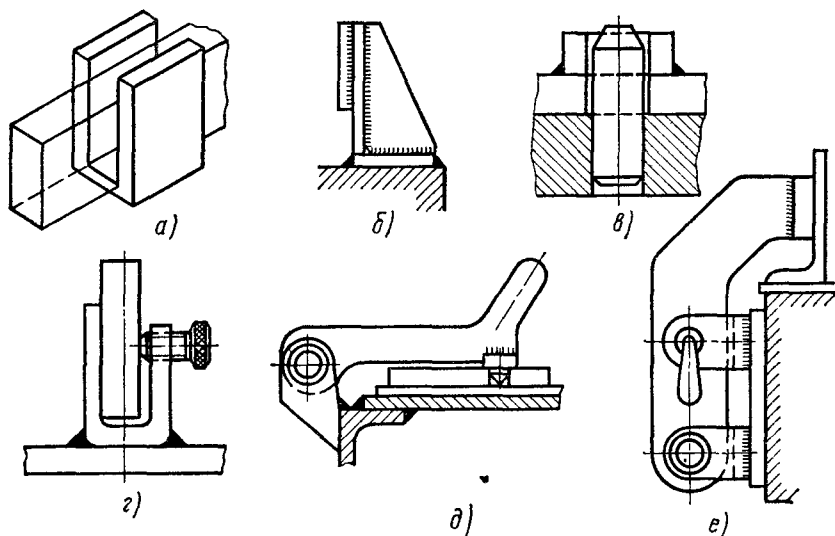


Рис. 75. Элементы сборочных приспособлений:

а — карман, *б* — упор, *в* — палец жесткий, *г* — зажим, *д* — палец откидной, *е* — упор откидной

стью для размещения крупногабаритных изделий в цехе. Сборочно-сварочные стенды более сложные устройства для размещения деталей собираемых и свариваемых крупногабаритных изделий и фиксации их в нужном положении. Примерами сборочно-сварочных стендов могут служить электромагнитные стенды при изготовлении плоскостных секций судовых корпусов, резервуаров, вагонов и других листовых конструкций.

В условиях единичного производства расположение деталей в свариваемом узле задается разметкой, для их закрепления используют струбины, планки, скобы с клиньями и другие простейшие универсальные приспособления.

Использование специальных сборочных приспособлений позволяет повысить производительность труда и качество сборки. Основой сборочного приспособления является жесткий каркас, несущий упоры, фиксаторы и прижимы (рис. 75). При сборке детали заводят в приспособление, укладывают по упорам и фиксаторам и закрепляют прижимами. Применяют прижимы с ручным и механическим приводом. Прижимы с ручным приводом (винтовые, рычажные, эксцентрикковые) просты, но требуют непосредственного ручного труда сборщика (рис. 76). Использование пневматических, гидравлических,

электромагнитных и вакуумных прижимов значительно сокращает вспомогательное время, особенно, если требуется зажать изделие в нескольких местах. Фиксацию собранных деталей для придания требуемой жесткости собранному узлу наиболее часто осуществляют на прихватке. Прихватки должны иметь ограниченное поперечное сечение и располагаться в местах, обеспечивающих их полную перварку при укладке основного шва.

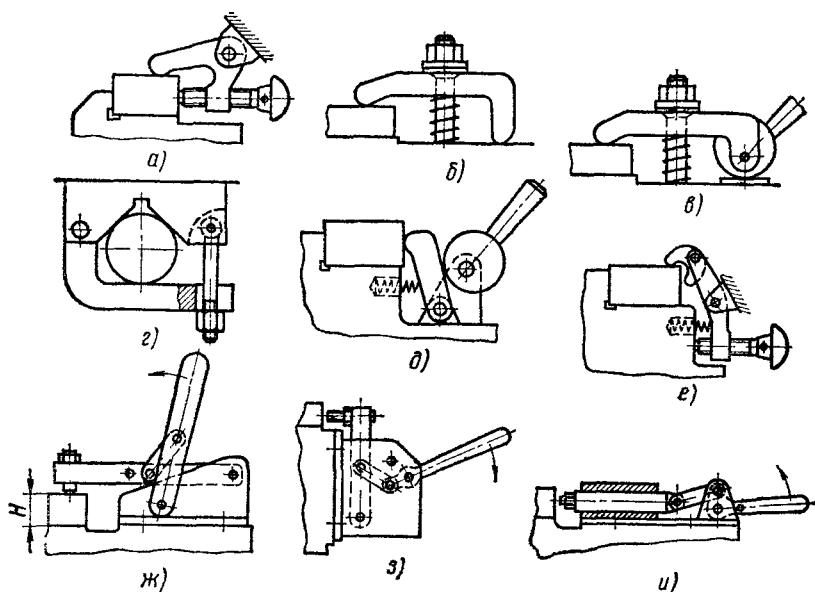


Рис. 76. Схемы механических зажимных устройств:
а, б, г, е — винтовые, *в, д* — эксцентриковые, *ж, з, и* — рычажные

Последовательность выполнения сборочно-сварочных операций может быть различной:

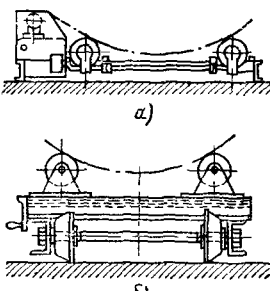
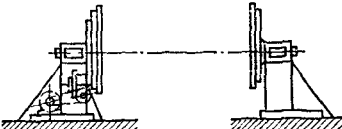
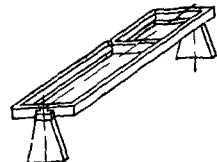
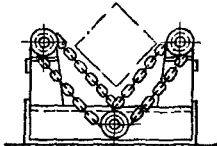
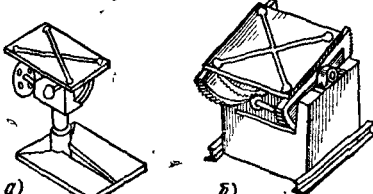
- сварку выполняют после полного завершения сборки;
- сборку и сварку производят попеременно, например, при изготовлении конструкции наращиванием отдельных элементов;
- общей сборке и сварке конструкции предшествует сборка и сварка узлов.

Для удобства выполнения тех или иных швов изделие приходится устанавливать в различные положения. Это осуществляется с помощью приспособлений — позиционеров, вращателей, кантователей, роликовых стенов, манипуляторов. Подобного рода приспособления (табл. 4) могут быть как установочные, предназначенные только для поворота изделия в положение, удобное для сварки того или иного шва, так и сварочные, обеспечивающие, кроме установки изделия, его вращения (перемещение) с заданной скоростью, равной скорости сварки.

Универсальные приспособления общего назначения (сборочные плиты, стеллажи, манипуляторы, кантователи, роликовые стенды) используют для сборки и сварки изделий широкой номенклатуры и различных размеров.

Для изделий определенного типа, но разных размеров, используют универсальные приспособления специального назначения, ко-

4. Поворотные приспособления для сборки и сварки изделий

Наименование и вид	Эскиз	Область применения
<p>Роликовые опоры:</p> <p>а — стационарные,</p> <p>б — передвижные (ручные и механические)</p>		<p>Для сварки тяжелых узлов и изделий, цилиндров, балок, сосудов</p>
<p>Кантователь</p>		<p>Для сварки массивных изделий и узлов</p>
<p>Поворотный стенд ручной механический</p>		<p>Для сварки средних и крупных узлов и деталей</p>
<p>Цепной кантователь</p>		<p>Для сварки громоздких и длинных изделий</p>
<p>Манипулятор:</p> <p>а — ручной,</p> <p>б — механический</p>		<p>Для сварки мелких и средних деталей в крупносерийном и массовом производстве</p>

торые конструируют в индивидуальном порядке. Универсальные приспособления применяют в единичном и мелкосерийном производстве. Помимо универсальных и специальных приспособлений в мелкосерийном и единичном производстве применяют универсально-сборочные приспособления, представляющие собой набор различных конструктивных элементов — универсальные плиты с продольными и поперечными пазами, типовые сменные упоры, фиксаторы, штыри, прихватыватели, планки, крепежные детали и т. п.

В условиях крупносерийного и массового производства используют специальные приспособления одноцелевого назначения для выполнения определенных операций при изготовлении конкретного изделия.

§ 59. Поточные механизированные и автоматизированные линии

Поточная линия — комплекс оборудования, взаимно связанного и работающего согласованно с определенным заданным ритмом по единому технологическому процессу. В сборочно-сварочные механизированные поточные линии входит оборудование для выполнения сборки, сварки, а иногда и операций подготовки металла, его раскрой, контроля готовой продукции и т. д.

По признаку механизации и автоматизации различают несколько типов поточных линий:

с частичной механизацией, при которой используется ручная и полуавтоматическая сварка, а остальные процессы производственного цикла — раскрой металла, резка, сборка, окраска и др. — выполняются вручную;

с комплексной механизацией, когда механизированы несколько операций; например, применяется механизированная резка и полуавтоматическая сварка;

с частичной автоматизацией, при которой основные процессы (резка, сварка) автоматизированы, а остальные работы (сборка, контроль качества, окраска) выполняются с применением механизированного инструмента и приспособлений.

Высшим типом являются поточные линии с комплексной автоматизацией. *Автоматические линии* представляют собой комплекс машин, выполняющих в заданной технологической последовательности весь цикл операций по производству изделий, с общими для всей линии механизмами управления и автоматически транспортными устройствами, перемещающими объект обработки от одной машины к другой. Примером автоматической линии могут служить сборочно-сварочные автоматические линии для производства сварных труб большого диаметра со спиральным швом, на которых с помощью автоматов под наблюдением небольшого количества операторов осуществляются все операции по изготовлению труб из стальной ленты.

В сварочном производстве используют сборочно-сварочные линии с различной степенью механизации и автоматизации оборудо-

вания и применяемой оснастки с учетом массовости, серийности и индивидуальности производства для многих видов сварных изделий — при сборке и сварке полотнищ, изготовлении обечаек, труб, сосудов, балок, решетчатых и корпусных конструкций, сварных заготовок для деталей машин.

§ 60. Применение роботов в сварке

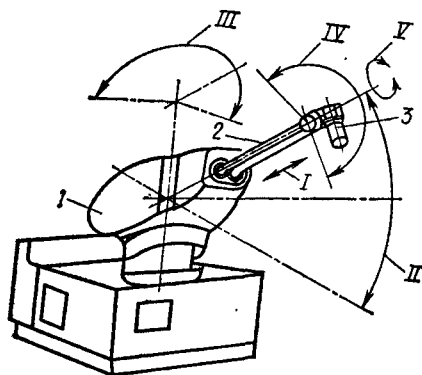
Промышленный робот представляет собой автоматическое устройство с программным управлением, быстро переналаживаемое для выполнения различных операций, обычно его рабочим органом является механическая ручка с тремя — шестью степенями свободы, т. е. количеством допускаемых независимых перемещений (продольных, поперечных, вращательных, угловых и т. п.).

Робот-манипулятор является универсальным устройством и может использоваться в различных производственных линиях в отличие от традиционных автоматических манипуляторов, которые разрабатывают и изготовляют применительно к одной конкретной производственной установке.

В сварочном производстве нашли преимущественно применение роботы, перемещающие сварочные клещи для контактной точечной сварки. Это связано с более низкими требованиями к перемещению клещей между точками при контактной сварке по сравнению с перемещением электрододержателя или горелки в процессе дуговой сварки. Роботы, предназначенные для дуговой сварки, должны осуществлять непрерывное движение электрода при регулируемых величинах перемещения, скорости и ускорения. Это усложняет его конструкцию и требует значительно большего объема памяти программирующих устройств.

Рис. 77. Схема исполнительных механизмов робота:

1 — корпус, 2 — рука, 3 — запястье; I — вытягивание, II — втягивание, III — подъем — опускание, IV — поворот, V — вращение



Робот, изображенный на рис. 77, используют в качестве носителя сварочных клещей для контактной сварки в автомобильной промышленности. В запоминающее устройство робота вводят программу. Программирование выполняет вручную оператор, который на первом экземпляре изделия с помощью пульта управления осуществляет необходимую последовательность перемещений сварочных клещей и выполнение сварки всех точек. Положение каждой свариваемой точки на рабочем пути фиксируется в программе. Вся программа начинает действовать по сигналу о том, что изделие заняло заданное положение относительно робота, после чего

робот в соответствии с заложенной программой производит необходимые манипуляции. Одним из основных преимуществ роботов наряду с автоматизацией процесса является возможность легкой и быстрой смены программы в зависимости от свариваемого изделия.

В целом применение роботов наиболее целесообразно в мелко- и среднесерийном производстве. В массовом производстве более целесообразны специализированные автоматические установки ввиду их большей производительности, например многоточечные контактные машины при большом объеме сварки. В единичном производстве рациональнее применение ручного управления сварочным процессом.

Существенным недостатком роботов первого поколения является требование высокой точности сборки свариваемых деталей и их расположения в рабочем пространстве робота. В настоящее время создаются сварочные роботы второго поколения с системами обратной связи, с помощью которых рабочая программа и манипуляции робота будут автоматически корректироваться при изменении положения изделия или его отдельных элементов. Такие роботы, оборудованные специальными датчиками, смогут, например, обеспечить автоматический обход встречающихся на пути элементов зажимных приспособлений. Наряду с совершенствованием обычных промышленных роботов создаются роботы, действующие в экстремальных (сложных, труднодоступных, опасных для человека) условиях — в агрессивных средах, под водой, в космосе.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы включают в себя технологический процесс изготовления сварной конструкции?
2. Из чего складывается время изготовления сварной конструкции?
3. Что такое основное время? Как оно определяется?
4. Что предусматривает комплексная механизация и автоматизация сварочного производства?
5. Что такое поточная линия?
6. Что такое промышленный робот? Как используются роботы в сварочном производстве?

Глава 17. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СВАРКЕ

§ 61. Основные дефекты сварных соединений и классификация методов их контроля

Классификация дефектов. В процессе образования сварного соединения в металле шва и зоне термического влияния могут возникать дефекты, т. е. отклонения от установленных норм и требований, приводящие к снижению прочности, эксплуатационной надежности, точности, а также ухудшению внешнего вида изделия. Дефекты сварных соединений различают по причинам возникновения и месту их расположения (наружные и внутренние).

В зависимости от причин возникновения их можно разделить на две группы. К первой группе относятся дефекты, связанные с металлургическими и тепловыми явлениями, происходящими в процессе образования, формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания сварного соединения, это — горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, поры, шлаковые включения, неблагоприятные изменения свойств металла шва и зоны термического влияния.

Ко второй группе дефектов, которые называют дефектами формирования швов, относят дефекты, происхождение которых связано

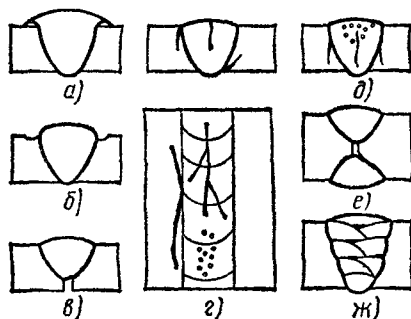


Рис. 78. Виды дефектов в сварных соединениях:

а — наплыв, *б* — подрез, *в* — непровар, *г* — наружные трещины и поры, *д* — внутренние трещины и поры, *е* — внутренний непровар, *ж* — шлаковые включения

в основном с нарушением режима сварки, неправильной подготовкой и сборкой элементов конструкции под сварку, неисправностью оборудования, небрежностью и низкой квалификацией сварщика и другими нарушениями технологического процесса. К дефектам этой группы относятся несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, незаваренные кратера и др.

Дефекты бывают наружные и внутренние. К наружным относят дефекты, которые могут быть обнаружены внешним осмотром

(дефекты формирования шва, трещины и поры, выходящие на поверхность, и др.). Для обнаружения внутренних дефектов требуются специальные методы неразрушающего и разрушающего контроля.

Дефекты оказывают большое влияние на прочность сварных соединений и нередко являются причиной преждевременного разрушения сварных конструкций. Особенно опасны трещиноподобные дефекты (трещины, непровары), резко снижающие прочность, особенно при циклических нагрузках. Некоторые виды дефектов приведены на рис. 78.

Дефекты формы шва. Отклонения размеров и формы сварного шва от проектных чаще всего наблюдаются в угловых швах и связаны с нарушением режимов сварки, неправильной подготовкой кромок под сварку, неравномерной скоростью сварки, а также с несвоевременным контрольным обмером шва.

Непроваром называют местное отсутствие сплавления между свариваемыми элементами, между металлом шва и основным металлом или отдельными слоями шва при многослойной сварке. Непровар уменьшает сечение шва и вызывает концентрацию напряжений, поэтому может значительно снизить прочность конструкции. Участки шва, где выявлены непровары, величина которых превосходит допустимую, подлежат удалению и последующей заварке. Не-

провар в корне шва в основном вызывается недостаточной силой тока или повышенной скоростью сварки, непровар кромки (несплавление с кромками) — смещением электрода с оси стыка, а также блужданием дуги, непровар между слоями — плохой очисткой предыдущих слоев, большим объемом наплавляемого металла, натеканием расплавленного металла перед дугой.

Подрезом называют местное уменьшение толщины основного металла у границы шва. Подрез приводит к уменьшению сечения металла и резкой концентрации напряжений в тех случаях, когда он расположен перпендикулярно действующим рабочим напряжениям.

Наплывом называют натекание металла шва на поверхность основного металла без сплавления с ним.

Прожогом называют полость в шве, образовавшуюся в результате вытекания сварочной ванны, является недопустимым дефектом сварного соединения.

Кратером называют незаваренное углубление, образующееся после обрыва дуги в конце шва. В кратере, как правило, образуются усадочные рыхлости, часто переходящие в трещины.

Ожогами называют небольшие участки подвергшегося расплавлению металла на основном металле вне сварного шва.

Подрезы, натеки, наплывы, прожоги, незаваренные кратеры, оставшиеся после сварки шлак и брызги, оплавление кромок (в угловых швах) вызываются преимущественно чрезмерной силой тока и напряжения на дуге, большим диаметром электрода, неправильными манипуляциями электродом, плохой сборкой под сварку, низкой квалификацией или небрежностью сварщика.

Классификация видов контроля сварных соединений. Сварные соединения считают качественными, если они не имеют недопустимых дефектов и их свойства удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним в соответствии с условиями эксплуатации сварного узла или конструкции.

Качество сварных соединений контролируют следующими видами контроля:

предварительным, в процессе которого выполняют проверку качества исходных материалов (свариваемого металла и сварочных материалов), контроль подготовки деталей под сварку и сборку узлов, а также состояния оснастки, сварочного оборудования и приборов, квалификации сборщиков и сварщиков;

текущим в процессе выполнения сварочных работ, предусматривающим проверку соблюдения технологии сварки — режимов, зачистки промежуточных швов, заварку кратеров и т. д.;

окончательным контролем готовых сварных конструкций, который проводится в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изделию.

На стадии предварительного контроля выполняют испытания на свариваемость, включающие в себя механические испытания, металлографические исследования сварных соединений и испытания на сопротивляемость образованию горячих и холодных трещин.

В зависимости от того, нарушается или не нарушается целостность сварного соединения при контроле, различают неразрушающие и разрушающие методы контроля.

§ 62. Методы неразрушающего контроля качества сварных соединений

К неразрушающим методам контроля качества сварных соединений относят:

внешний осмотр;

контроль на непроницаемость гидравлическим испытанием, керосином, сжатым воздухом, вакуумированием, теческательями;

методы, применяемые преимущественно для обнаружения дефектов, выходящих на поверхность сварных соединений (магнитный, электромагнитный, люминесцентный, цветной);

методы, применяемые преимущественно для обнаружения скрытых и внутренних дефектов (радиационный, ультразвуковой, магнитографический).

Внешний осмотр служит для определения наружных дефектов сварных швов: несоответствие геометрических размеров швов проектным (размеры швов и дефектов определяют измерительным инструментом и специальными шаблонами), подрезы, непровары, поверхностные трещины и наружные поры, крупная чешуйчатость и неравномерность шва, незаплавленные кратеры, коробление изделия или отдельных его элементов. Внешний осмотр производят невооруженным глазом или лупой не более 10-кратного увеличения. Контролю внешним осмотром подвергают все сварные конструкции.

Испытаниям на непроницаемость подвергают емкости для хранения жидкостей, сосуды и трубопроводы, работающие при избыточном давлении.

При гидравлическом испытании емкости наполняют водой, а в сосудах и трубопроводах создают избыточное давление жидкости, превышающее в 1,5—2 раза рабочее давление. В таком состоянии изделие выдерживают в течение 5—10 мин. Швы осматривают с целью обнаружения течи, капель и отпотеваний. Этот способ испытания одновременно служит для оценки прочности конструкции.

При пневматическом испытании в сосуды нагнетают сжатый воздух под давлением, превышающем атмосферное на 10—20 кПа, швы смачивают мыльным раствором или все изделие опускают в воду. Наличие неплотности в швах определяют по мыльным пузырькам или пузырькам воздуха в воде.

Вакуум-метод основан на создании вакуума и регистрации проникновения воздуха через дефекты на одной, доступной для испытаний стороне шва. В качестве пенного индикатора используют мыльный раствор.

При испытании с помощью гелиевого теческателя внутри сосуда создают вакуум, а снаружи швы обдувают смесью воздуха с гелием. При наличии неплотностей гелий, обладающий исключительной про-

никающей способностью, проникает в сосуд, откуда отсасывается в течеискатель со специальной аппаратурой для его обнаружения. По количеству уловленного гелия судят о неплотности швов.

При испытании керосином сварные швы с одной стороны смазывают керосином, а с другой — мелом. При наличии неплотности на поверхности шва, окрашенной мелом, появляются темные пятна керосина. Благодаря высокой проникающей способности керосина обнаруживают дефекты размером 0,1 мм и менее.

Магнитные методы контроля основаны на обнаружении полей магнитного рассеяния, образующихся в местах дефектов при намагничивании контролируемых изделий. Изделие намагничивают, замыкая им сердечник электромагнита или помещая внутрь соленоида. Требуемый магнитный поток можно создать пропуская ток по виткам (3—6 витков) сварочного провода, наматываемого на контролируемую деталь. В зависимости от способа обнаружения потоков рассеяния различают следующие методы магнитного контроля: метод магнитного порошка, индукционный и магнитографический.

При методе магнитного порошка на поверхность намагниченного соединения наносят магнитный порошок (окалина, железные опилки и т. д.) в сухом виде (сухой способ) или суспензию магнитного порошка в жидкости (керосине, мыльном растворе, воде — мокрый способ). Над местом расположения дефекта создадутся скопления порошка в виде правильно ориентированного магнитного спектра. Для облегчения подвижности порошка изделие слегка обстукивают. С помощью магнитного порошка выявляют трещины, невидимые невооруженным глазом, внутренние трещины на глубине не более 15 мм, расслоение металла, а также крупные поры, раковины и шлаковые включения на глубине не более 3—5 мм.

При индукционном методе магнитный поток в изделии наводят электромагнитом переменного тока. Дефекты обнаруживают с помощью искателя, в катушке которого под действием поля рассеяния индуктируется э. д. с., вызывающая оптический или звуковой сигнал на индикаторе.

При магнитографическом методе поле рассеяния фиксируется на эластичной магнитной ленте, плотно прижимаемой к поверхности соединения. Запись воспроизводится на магнитографическом дефектоскопе. В результате сравнения контролируемого соединения с эталоном делается вывод о качестве соединения.

Радиационные методы контроля являются надежными и широко распространенными методами контроля, основанными на способности рентгеновского и гамма-излучения проникать через металл. Выявление дефектов при радиационном просвечивании основано на различном поглощении рентгеновского или гамма-излучения участками металла с дефектами и без них. Сварные соединения просвечивают специальными аппаратами. С одной стороны шва на некотором расстоянии от него помещают источники излучения, с противоположной стороны плотно поджимают кассету с чувствительной пленкой (рис. 79). При просвечивании лучи проходят

через сварное соединение и облучают пленку. В местах, где имеются поры, шлаковые включения, непровары, крупные трещины на пленке образуются более темные пятна. Вид и размеры дефектов определяют сравнением пленки с эталонными снимками. Просвечивание не

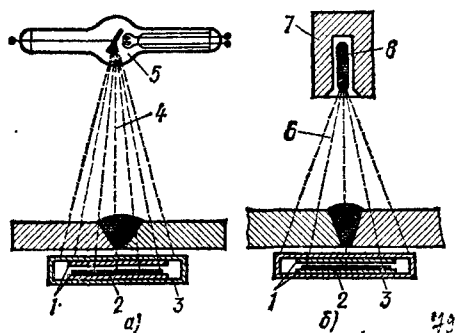


Рис. 79. Схема просвечивания сварных швов:

а — рентгеновским излучением, б — гамма-излучением; 1 — усиливающие экраны, 2 — рентгеновская пленка, 3 — кассета, 4 — рентгеновское излучение, 5 — рентгеновская трубка, 6 — гамма-излучение, 7 — свинцовый кожух, 8 — ампула радиоактивного вещества

позволяет выявить трещины, если они расположены не по направлению центрального луча (угол более 5°), а также непровары в виде слипания свариваемых металлов без газовой или шлаковой прослойки.

Источниками рентгеновского излучения служат специальные рентгеновские аппараты (РУП-150-10, РУП-120-5-1, импульсные аппараты — ИРА-1Д, ИРА-2Д, РИНА-1Д и др.). Рентгенопросвечиванием целесообразно выявлять дефекты в металле толщиной до 60 мм. При этом фиксируют дефекты,

размеры которых составляют 1—3% от толщины металла.

Наряду с рентгенографированием, т. е. экспозицией на пленку, применяют рентгеноскопию, т. е. получение сигнала о дефектах при просвечивании металла на экране. Экран покрывают флюоресцирующими веществами (платино-синеродистый барий, сернистый цинк и др.), которые дают свечение при действии рентгеновского излучения. В связи с различной степенью поглощения излучения в разных участках металла свечение различно. Контроль рентгеновским излучением с использованием экранов применяют в сочетании с телевизионными устройствами, преобразующими рентгеновское изображение в видимое (установка типа РИ — рентгенотелевизионный интроскоп). Чувствительность рентгеноскопического контроля не уступает рентгенографическому (1% и более), а производительность выше. Преимуществом рентгенографии является наличие документа о качестве соединения в виде пленки.

При просвечивании сварных соединений гамма-излучением источником излучения служат радиоактивные изотопы: кобальт-60, тулий-170, иридий-192 и др. Ампулу с радиоактивным изотопом помещают в свинцовый контейнер. Техника просвечивания сварных соединений гамма-излучением подобна технике рентгеновского просвечивания. Этим способом выявляют аналогичные внутренние дефекты по потемнению участков пленки, помещенной в кассету. Гамма-излучение отличается от рентгеновского большей жесткостью и меньшей длиной волны, поэтому оно может проникать в металл глубже, чем рентгеновское излучение. Оно позволяет просвечивать металл толщиной до 300 мм. Благодаря портативности аппаратуры

его можно применять в любых условиях (в цехах, полевых условиях, на монтаже и т. п.). Кроме того, просвечивание гамма-излучением менее дорогостоящий способ.

Недостатками просвечивания гамма-излучением по сравнению с рентгеновским являются: меньшая чувствительность (при просвечивании толщины до 50 мм обнаруживаются относительно крупные дефекты с размерами более 2—4% толщины металла); невозможность регулирования интенсивности излучения, которая в рентгеновских аппаратах регулируется подводимым напряжением, большая опасность гамма-излучения при неосторожном обращении с гамма-аппаратами.

Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых волн отражаться от поверхности раздела двух сред. В дефектоскопии применяют пьезоэлектрический способ получения ультразвуковых волн, основанный на возбуждении механических колебаний (вибрации) в пьезоэлектрических материалах (кварц, сульфат лития, титанат бария и др.) при наложении переменного электрического поля. Упругие колебания достигают максимального значения тогда, когда частота электрических колебаний совпадает с колебаниями пьезопластины датчика. Частоты ультразвуковых колебаний обычно превышают 20 000 Гц.

С помощью пьезометрического щупа ультразвукового дефектоскопа, помещаемого на поверхность сварного соединения, в металл посылают направленные ультразвуковые колебания (рис. 80). Ультразвук вводят в изделие отдельными импульсами под углом к поверхности металла. При встрече с дефектом возникает отраженная ультразвуковая волна, которая воспринимается либо другим щупом (приемным в случае двухщуповой схемы), либо тем же (подающим при однощуповой схеме) во время паузы между импульсами. Отраженный ультразвуковой сигнал преобразуется в электрический, усиливается и подается на трубку осциллографа, где фиксируется наличие дефекта в соединении в виде пика на экране осциллографа.

Ультразвуковой контроль имеет следующие основные преимущества:

высокая чувствительность (1—2%), позволяющая обнаруживать, измерять и определять местонахождение дефектов площадью 1—2 мм²;

большая проникающая способность ультразвуковых волн, позволяющая контролировать материалы большой толщины (стали до 2,5 м);

возможность контроля всего сварного соединения только с одной стороны;

высокая производительность;

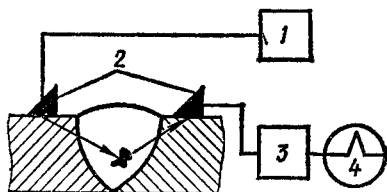


Рис. 80. Схема ультразвукового контроля:

1 — генератор ультразвуковых колебаний, 2 — пьезоэлектрический щуп, 3 — усилитель, 4 — экран дефектоскопа

отсутствие громоздкого оборудования (приборы УЗД-7, УДМ-1М ДУК-13ИМ и др.).

Существенным недостатком ультразвукового метода является сложность установления вида дефекта.

Ультразвуковой контроль применяют и как основной вид контроля, и как предварительный с последующим просвечиванием сварных соединений рентгеновским или гамма-излучением.

§ 63. Разрушающие методы контроля сварных соединений

К способам контроля сварных соединений с их разрушением относятся:

- механические испытания;
- металлографические исследования;
- специальные испытания с целью получения характеристик сварных соединений.

Эти испытания проводят на сварных образцах, вырезаемых из самого изделия или из специально сваренных контрольных соединений, выполненных в соответствии с требованиями и технологией на сварку изделия в условиях, соответствующих сварке. Целью этих испытаний являются:

- оценка прочности и надежности сварных соединений и конструкций;
- оценка качества основного и сварочного материалов;
- оценка правильности выбранной технологии;
- оценка квалификации сварщиков.

Свойства сварного соединения сопоставляют со свойствами основного металла. Результаты считаются неудовлетворительными, если они не соответствуют заданному регламентированному уровню.

Основными испытаниями являются механические испытания по ГОСТ 6996—66, который предусматривает следующие виды испытаний сварных соединений и металла шва:

- испытание сварного соединения в целом и металла различных участков сварного соединения (наплавленного металла, зоны термического влияния, основного металла) на статическое (кратковременное) растяжение, статический изгиб, ударный изгиб (на надрезанных образцах), на стойкость против механического старения;
- измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла.

Контрольные образцы для механических испытаний выполняют определенных размеров (рис. 81).

Испытаниями на статическое растяжение определяют прочность сварных соединений. Испытаниями на статический изгиб определяют пластичность соединения по величине угла изгиба до образования первой трещины в растянутой зоне. Испытания на статический изгиб проводят на образцах с продольными и поперечными швами со снятым усилением шва заподлицо с основным металлом. Испытаниями на ударный изгиб, а также ударный разрыв, определяют ударную вязкость сварного соединения.

По результатам определения твердости судят о структурных изменениях и степени подкалки металла при охлаждении после сварки.

Металлографические исследования сварных соединений. Основной задачей металлографического анализа является установление структуры металла и качества сварного соединения, выявление на-

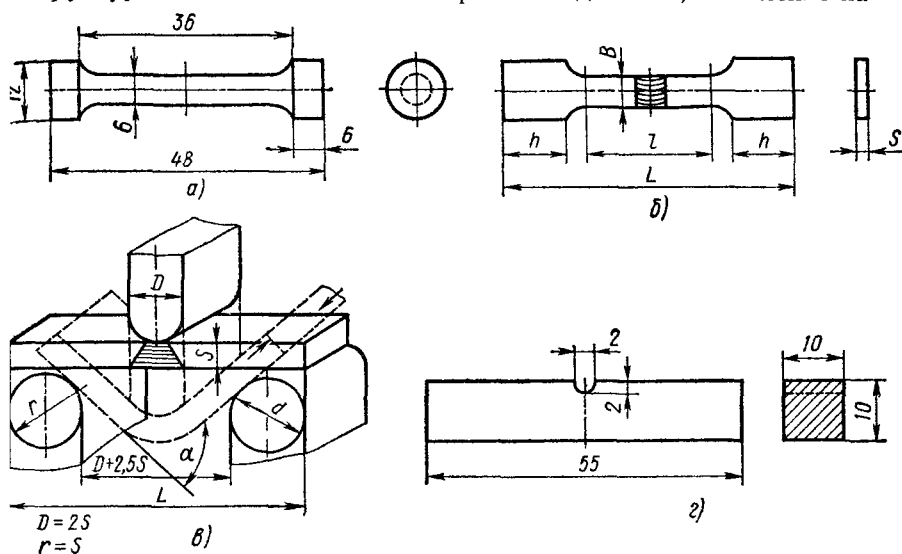


Рис. 81 Образцы для определения механических свойств:

a, б — на растяжение наплавленного металла (*a*) и сварного соединения (*б*), *в* — на изгиб, *г* — на ударную вязкость

личия и характера дефектов. Металлографические исследования включают в себя макро- и микроструктурный методы исследования металлов.

При макроструктурном методе изучают макрошлифы и изломы металла невооруженным глазом или лупой (увеличение до 20 раз). Макроисследование позволяет определить характер и расположение видимых дефектов в разных зонах сварных соединений.

При микроструктурном анализе (микроанализ) исследуется структура металла при увеличении в 50—2000 раз с помощью оптических микроскопов. Микроисследование позволяет установить качество металла, в том числе обнаружить пережог металла, наличие окислов по границам зерен, засоренность металла неметаллическими включениями (оксидами, сульфидами), величину зерен металла, изменение состава металла при сварке, микроскопические трещины, поры и некоторые другие дефекты структуры.

Методика изготовления шлифов для металлографических исследований заключается в вырезке образцов из сварных соединений, шлифовке, полировке и травлении поверхности металла специальными травителями.

Металлографическое исследование сварных соединений дополняется измерением твердости и при необходимости химическим анализом.

Специальные испытания проводят с целью получения характеристик сварных соединений, учитывающих условия эксплуатации сварной конструкции:

определение коррозионной стойкости для конструкций, работающих в коррозионных средах;

усталостной прочности при циклических нагрузках;

ползучести при эксплуатации в условиях воздействия повышенных температур и др.

§ 64. Техника безопасности при сварке

Техника безопасности — совокупность технических и организационных мероприятий, направленных на создание безопасных и здоровых условий труда.

Основными опасностями и вредностями, приводящими к производственным травмам при сварке, являются:

поражение электрическим током при электросварочных работах;

поражение зрения и открытой поверхности кожи излучением электрической дуги;

отравление организма вредными газами, пылью и испарениями, выделяющимися при сварке;

травмы от взрывов баллонов сжатого газа, ацетиленовых генераторов и сосудов из-под горючих веществ;

пожарная опасность и ожоги;

механические травмы при заготовительных и сборочно-сварочных операциях;

опасность радиационного поражения при контроле сварных соединений радиационными методами.

Каждый рабочий при поступлении на работу проходит инструктаж или специальный техминимум по технике безопасности. Ответственность за организацию и состояние техники безопасности на предприятиях несет администрация этих предприятий.

Общий контроль за выполнением норм и правил охраны труда, в том числе правил техники безопасности, осуществляют соответствующие инспекции (Госгортехнадзор, Госсанинспекция, Инспекция пожарного надзора, Госэнергонадзор) и профсоюзные организации.

Комплекс мероприятий по производственной санитарии, гигиене труда, организации отдыха, медицинскому обслуживанию и технике безопасности обеспечивают охрану труда работающих на социалистических предприятиях.

Электробезопасность. Поражение электрическим током происходит при прикосновении с токоведущими частями электропроводки и сварочной аппаратуры, применяемой для дуговой, контактной и лучевой видов сварки. Токи, проходящие через тело человека, величиной более 0,05 А (при частоте 50 Гц) могут вызывать тяжелые последствия и даже смерть ($>0,1$ А). Сопротивление человеческого

организма в зависимости от его состояния (утомленность, влажность кожи, состояние здоровья) меняется в широких пределах от 1000 до 20 000 Ом. Напряжение холостого хода источников питания нормальной дуги достигает 90 В, а сжатой дуги — 200 В. В соответствии с законом Ома при неблагоприятном состоянии сварщика через него может пройти ток, близкий к предельному:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{90}{1000} = 0,09 \text{ А.}$$

Электробезопасность обеспечивается:

выполнением требований к электробезопасности электросварочного оборудования надежной изоляцией, применением защитных ограждений, автоблокировки, заземлением электрооборудования и его элементов, ограничением напряжения холостого хода источников питания (генераторы постоянного тока до 80 В, трансформаторы до 90 В);

индивидуальными средствами защиты (работа в сухой и прочной спецодежде и рукавицах, в ботинках без металлических шпилек и гвоздей);

соблюдением условий работы (прекращение работы при дожде и сильном снегопаде при отсутствии укрытий; пользование резиновым ковриком, резиновым шлемом и галошами при работе внутри сосудов; а также переносной лампой напряжением не более 12 В; ремонт электросварочного оборудования и аппаратуры специалистами — электриками).

При поражении электрическим током пострадавшему необходимо оказать помощь: освободить от электропроводов (с соблюдением техники безопасности), обеспечить доступ свежего воздуха, при потере пострадавшим сознания немедленно вызвать скорую медицинскую помощь, а до прибытия врача делать искусственное дыхание.

Защита зрения и открытой поверхности кожи. Электрическая сварочная дуга создает три вида излучения: световое, ультрафиолетовое, инфракрасное.

Световые лучи оказывают ослепляющее действие, так как их яркость значительно превышает норму, допускаемую для человеческого глаза (до 10 000 раз). Ультрафиолетовые лучи даже при кратковременном действии в течение нескольких секунд вызывают заболевание глаз, называемое электроофтальмией. Оно сопровождается острой болью, резью в глазах, слезотечением, спазмами век. Продолжительное действие ультрафиолетовых лучей приводит к ожогам кожи. Инфракрасные лучи при длительном действии вызывают помутнение хрусталиков глаз (катаракта), что может привести к ослаблению и потере зрения, тепловое действие этих лучей вызывает ожоги кожи. Защита зрения и кожи лица при дуговой сварке обеспечивается применением щитков, масок или шлемов, в смотровое отверстие которых вставляют светофильтры, задерживающие и поглощающие излучение дуги. В зависимости от мощности дуги изменяют различные светофильтры. Для защиты окружающих от

излучения дуги в стационарных условиях устанавливают закрытые кабины, а при строительных и монтажных работах применяют переносные щиты и ширмы.

Защита от отравлений вредными газами, пылью и испарениями. Состав и количество вредных газов, пыли и испарений зависит от вида сварки, состава защитных средств (покрытий, флюсов, газов), свариваемого и электродного материалов. Количество сварочной пыли (аэрозоли) и летучих соединений при сварке составляет от 10 до 150 г на 1 кг расплавленного электродного металла. Основными составляющими являются окислы железа (до 70%), марганца, кремния, хрома, фтористые и другие соединения. Наиболее вредными являются хром, марганец и фтористые соединения. Кроме аэрозоли, воздух в рабочих помещениях при сварке загрязняется различными вредными газами: окислами азота, углерода, фтористым водородом и др.

Наряду с кратковременным отравлением, которое проявляется в виде головокружения, головной боли, тошноты, рвоты, слабости и др., отравляющие вещества могут откладываться в тканях организма человека и вызывать хронические заболевания. Особое внимание обращается на концентрацию марганца, так как его наличие в воздухе 0,3 мг/м³ и выше может вызвать тяжелые заболевания нервной системы.

Наиболее вредной является сварка покрытыми электродами, при автоматических методах сварки количество вредных выделений значительно меньше.

Основными мероприятиями, направленными на защиту от отравления вредными выделениями при сварке и улучшение условий труда, являются:

- применение местной и общеобменной вентиляции;
- механизация и автоматизация сварочных процессов;
- замена вредных процессов и материалов менее вредными (например, замена электродов с кислым покрытием с большим содержанием окиси марганца на рутиловые);

- применение изолирующих и защитных устройств;
- в особо опасных случаях использование индивидуальных средств защиты (респираторы с химическим шлемом, противогазы).

Взрывобезопасность. Взрывы возможны при неправильной транспортировке, хранении и использовании баллонов со сжатыми газами, сварочных работах в емкостях без предварительной тщательной их очистки от остатков горючих веществ. При процессах газопламенной обработки возможны взрывы ацетиленовых генераторов от обратного удара пламени, если не срабатывает водяной затвор; взрывы кислородных баллонов в момент их открывания, если на штуцере баллона или на клапане редуктора имеется масло.

Для обеспечения взрывобезопасности транспортировка баллонов разрешается на рессорных транспортных средствах, специальных ручных тележках и носилках, в специальных контейнерах, необходимо предохранять баллоны от толчков и ударов. На рабочих местах баллоны должны надежно крепиться в вертикальном

положении, на значительном расстоянии от нагревательных приборов, не подвергаться действию солнечных лучей. Совместное хранение баллонов с горючими газами и кислородом не допускается.

Эксплуатация грязных, с вмятинами и царапинами, несвоевременно испытанных баллонов не допускается. Особенно следует обращать внимание на отсутствие масла или грязи на штуцере вентиля кислородных баллонов.

Не допускается работа ацетиленовых генераторов без водяного затвора и с неисправным затвором.

Сварочные работы в емкостях из-под горючих продуктов производят только после их тщательной очистки от остатков продуктов и двух-трехкратной промывки горячим 10%-ным раствором щелочи с последующей продувкой паром или воздухом. Газопроводы можно ремонтировать только после тщательной продувки.

Пожарная безопасность. Причинами пожара при сварочных работах могут быть искры и капли расплавленного металла и шлака, неосторожное обращение с пламенем горелки при наличии горючих материалов вблизи рабочего места сварщика. Опасность пожара особенно следует учитывать на строительно-монтажных площадках и при ремонтных работах в непригодных для сварки помещениях.

Основные требования пожарной безопасности изложены в «Правилах пожарной безопасности при проведении сварочных и других огневых работ на объектах народного хозяйства». Места, где выполняется сварка, должны быть оснащены огнетушителями, ящиками с песком, лопатами и совками, бочками или ведрами с водой. Деревянные конструкции, расположенные ближе 5 м от сварочных постов, оштукатуривают или обивают листовым асбестом или листовой сталью по войлоку, смоченному в глинистом растворе. В зоне попадания брызг металла и искр не должно быть воспламеняющихся предметов. Легковоспламеняющиеся и взрывоопасные материалы должны быть на расстоянии не менее 30 м от места сварки. Деревянные полы, настилы, помосты при необходимости защищают от искр и капель расплавленного металла и шлака листами асбеста или железа. Сварщики обеспечиваются спецодеждой, обувью, перчатками и головным убором.

Т р а в м ы (ушибы, порезы) имеют место при заготовительных и сборочно-сварочных операциях. Причиной таких травм является несоблюдение техники безопасности при работе на металлорежущем оборудовании (при заготовительных операциях), отсутствие приспособлений для транспортировки и сборки тяжелых деталей, неисправные транспортные средства (тележки, краны и т. д.) и небрежный такелаж (канаты, цепи, тросы, захваты), несоблюдение персоналом основных правил по такелажным работам, а также неисправный инструмент (кувалды, молотки, зубила, ключи и т. д.).

Основными мерами по снижению травматизма являются продуманная с точки зрения безопасности работ технология заготовки, сборки и сварки, правильное оснащение рабочих мест и соблюдение персоналом основных правил по технике безопасности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть I. Основы теории сварки	
Глава 1. Классификация видов сварки, наплавки, термической резки металлов и сварные соединения	4
§ 1. Классификация и сущность сварки, наплавки и термической резки	4
§ 2. Сварные соединения и швы	6
Глава 2. Термические источники энергии при сварке	9
§ 3. Основные термические источники энергии при сварке	9
§ 4. Сварочная дуга	9
§ 5. Газовое пламя	13
§ 6. Лучевые источники энергии	14
§ 7. Электрошлаковый процесс	18
Глава 3. Физико-химические процессы при сварке	19
§ 8. Общие сведения	19
§ 9. Плавление электродного и основного металла	20
§ 10. Формирование и кристаллизация сварочной ванны	23
§ 11. Металлургические процессы при сварке	25
§ 12. Термический цикл сварки и структура сварного соединения	28
Глава 4. Деформации и напряжения	30
§ 13. Понятие о деформациях и напряжениях	30
§ 14. Деформации и напряжения при сварке	32
§ 15. Способы уменьшения сварочных деформаций и напряжений	35
§ 16. Прочность сварных соединений и конструкций	37
Глава 5. Свариваемость металлов и свойства сварных соединений	39
§ 17. Понятие и показатели свариваемости	39
§ 18. Окисляемость металла при сварке, образование пор и включений, чувствительность металла к тепловому воздействию сварки	40
§ 19. Горячие и холодные трещины при сварке	41
§ 20. Коррозионная стойкость сварных соединений	44
§ 21. Свариваемость сталей	45
Часть II. Материалы, оборудование, технология сварки, наплавки, резки	
Глава 6. Сварочные материалы	48
§ 22. Стальная сварочная и наплавочная проволока	48
§ 23. Электроды для ручной дуговой сварки и наплавки	49
§ 24. Сварочные флюсы	52
§ 25. Защитные газы	53

Глава 7. Источники питания и установки для дуговой сварки	55
§ 26. Обеспечение устойчивости горения сварочной дуги, требования к источникам питания	55
§ 27. Сварочные трансформаторы, выпрямители и генераторы	58
§ 28. Установки для механизированной дуговой сварки	63
Глава 8. Ручная дуговая сварка плавящимся электродом	65
§ 29. Сущность способа, оборудование, принадлежности, инструмент	65
§ 30. Техника ручной дуговой сварки	66
§ 31. Повышение производительности ручной дуговой сварки	70
Глава 9. Сварка под флюсом и электрошлаковая сварка	72
§ 32. Сущность сварки под флюсом	72
§ 33. Оборудование для сварки под флюсом	73
§ 34. Технология сварки под флюсом	75
§ 35. Электрошлаковая сварка	77
Глава 10. Сварка в защитных газах	79
§ 36. Общие сведения	79
§ 37. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом	80
§ 38. Сварка в защитных газах плавящимся электродом	85
Глава 11. Дуговая наплавка и резка металлов	88
§ 39. Общие сведения о наплавке	88
§ 40. Виды наплавки	90
§ 41. Дуговая резка металлов	92
Глава 12. Газовая сварка и резка	94
§ 42. Оборудование и аппаратура для газовой сварки и резки	94
§ 43. Технология газовой сварки	99
§ 44. Технология газокислородной резки	102
Глава 13. Сварка давлением	105
§ 45. Сущность процессов сварки давлением	105
§ 46. Электрическая контактная сварка	106
§ 47. Оборудование для контактной сварки	112
§ 48. Некоторые специальные виды сварки давлением	114
Часть III. Технология сварки конструкционных материалов и производство сварных конструкций	
Глава 14. Технология сварки сталей и чугуна	121
§ 49. Классификация сталей	121
§ 50. Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей	122
§ 51. Сварка легированных и углеродистых закаливающихся сталей	123
§ 52. Сварка высоколегированных сталей	125
§ 53. Сварка чугуна	128
Глава 15. Сварка цветных металлов	131
§ 54. Общие сведения	131
§ 55. Сварка алюминия и его сплавов	132
§ 56. Сварка меди и ее сплавов	133
Глава 16. Механизация и автоматизация сварочного производства	138
§ 57. Технологический процесс изготовления сварных конструкций и нормирование сварки	138
§ 58. Сборочные работы и их механизация	139
§ 59. Поточные механизированные и автоматизированные линии	143
§ 60. Применение роботов в сварке	144

Глава 17. Контроль качества сварных соединений. Техника безопасности при сварке	145
§ 61. Основные дефекты сварных соединений и классификация методов их контроля	145
§ 62. Методы неразрушающего контроля качества сварных соединений	148
§ 63. Разрушающие методы контроля сварных соединений	152
§ 64. Техника безопасности при сварке	154

ОЛЕГ ИВАНОВИЧ СТЕКЛОВ

ОСНОВЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научный редактор Л. П. Шебеко. Редактор Н. А. Цветкова.
Художественный редактор В. П. Спинова. Технический редактор Н. В. Яшукова. Корректор Г. А. Четчина

ИБ № 2816

Изд. № М-138. Сдано в набор 23.09.80. Подп. в печать 13.01.81. Т-00821. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 10 усл. печ. л. 10,25 усл. кр.-отт. Уч.-изд. л. 10,26. Тираж 150 000 экз. Зак. № 2160. Цена 25 коп.

Издательство «Высшая школа», Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14

Ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28

ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ



СВАРКА

О.И. СТЕКЛОВ

ОСНОВЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА