

В. В. ОВЧИННИКОВ

# ТЕХНОЛОГИЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ И РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

## УЧЕБНИК

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

*Регистрационный номер рецензии 148  
от 28 апреля 2009 г. ФГУ «ФИРО»*

5-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2016

УДК 621.791(075.32)  
ББК 34.641:34.642я722  
О-355

Рецензент —  
преподаватель высшей категории ГОУ СПО  
«Строительный колледж № 26», г. Москва Л. М. Карлухина

**Овчинников В. В.**

О-355 Технология ручной дуговой и плазменной сварки и резки металлов : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. В. Овчинников. — 5-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2016. — 240 с.

ISBN 978-5-4468-4150-9

Учебник является частью учебно-методического комплекта по профессии «Сварщик». В краткой форме изложены основы химии, физики, технологии металлов и конструкционных материалов, электротехники и других технических дисциплин. Приведены общие сведения о дуговой сварке и резке металлов, технологии сварки цветных металлов и сплавов. Описано оборудование для дуговой и плазменной сварки и резки.

Учебник может быть использован при освоении профессионального модуля ПМ.02 «Сварка и резка деталей из различных сталей, цветных металлов и их сплавов, чугунов во всех пространственных положениях» (МДК.02.02) в соответствии с ФГОС СПО по профессии «Сварщик (электросварочные и газосварочные работы)».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.791(075.32)  
ББК 34.641:34.642я722

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

ISBN 978-5-4468-4150-9

© Овчинников В. В., 2010  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

## Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по профессии «Сварщик» (электросварочные и газосварочные работы).

Учебник предназначен для изучения профессионального модуля ПМ.02 «Сварка и резка деталей из различных сталей, цветных металлов и их сплавов, чугунов во всех пространственных положениях».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включены терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

## Предисловие

В течение последнего столетия сварка стала одним из наиболее распространенных технологических процессов. Трудно назвать какой-либо другой процесс, который развивался бы с такой же интенсивностью. Решение множества важнейших технических проблем современности неразрывно связано с необходимостью получения сварных соединений, способных работать в различных условиях, в том числе экстремальных.

Конечным продуктом сварочного производства являются сварные конструкции. Общие объемы производства сварных конструкций в мире составляют сотни миллионов тонн в год. Создание экономичных, надежных и долговечных сварных конструкций, работающих на земле и под водой при нормальных, высоких и криогенных температурах, в агрессивных средах и при интенсивном радиационном облучении, в различных экстремальных условиях эксплуатации, является важной научно-технической проблемой.

Сварка предоставляет широкие возможности для оптимизации конструктивных решений, снижения трудоемкости изготовления конструкций, использования рациональных типов конструктивных элементов, позволяющих существенно уменьшить металлоемкость. Сварку как один из видов получения неразъемных соединений широко применяют в различных отраслях техники.

За последние 20 лет разработаны и освоены новые, в том числе специальные, виды (методы) сварки, которые внесли коренные изменения в технологию изготовления машин, механизмов, приборов и сооружений. Поэтому есть основания полагать, что и в XXI в. технология сварочного производства будет интенсивно развиваться.

Сварка плавлением несомненно останется основным видом сварки, применяемым в различных областях техники, так как позволяет создавать конструкции, отличающиеся высокой технологичностью, обеспечивает короткие сроки изготовления, ремонта, восстановления и модернизации конструкций при большой экономии труда и металла.

Непрерывное совершенствование техники и технологии сварочного производства вызывает необходимость в систематическом улучшении профессиональной подготовки сварщиков и специалистов сварочного производства, повышении их производственной квалификации и уровня теоретических знаний.

В данном учебнике освещены основные вопросы, возникающие при выполнении соединений различными видами ручной дуговой сварки; приведены данные по технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами, ручной дуговой сварки в защитных газах и плазменной сварки; рассмотрены особенности сварки сталей различных классов, чугунов и цветных металлов; приведены характеристики оборудования для дуговой сварки и резки металлов.

## СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКОЙ

### 1.1. ВИДЫ СОЕДИНЕНИЙ

*Сварным соединением* называется неразъемное соединение, выполненное сваркой. Сварное соединение включает в себя сварной шов, зону термического влияния (ЗТВ) и примыкающие к ней участки основного металла.

*Зона термического влияния* при сварке — это участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, но структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке.

Сварные соединения (рис. 1.1) бывают следующих видов:

- стыковые;
- угловые;
- торцовые;
- нахлесточные;
- тавровые.

**Стыковое соединение** — это соединение двух элементов, примыкающих друг к другу торцевыми поверхностями (рис. 1.2).

Стыковое соединение без скоса свариваемых кромок применяют при соединении листов толщиной до 12 мм, при этом кромки листов срезают под прямым углом к плоскости. Листы толщиной до 4 мм сваривают односторонним швом; толщиной 2...12 мм — двухсторонним швом. Подготовка к сварке такого соединения не сложна и недорога; она предусматривает только стыковку свариваемых кромок.

Двухсторонний сварной шов повышает прочность сварного соединения, однако приложение значительных долговременных нагрузок из-за наличия непроваренного участка в корне шва может привести к разрушению соединения. Полное проплавление при одностороннем сварном шве достигается при толщине металла до 4 мм. При сварке двухсторонним сварным швом полное проплавление обеспечивается при толщине металла до 8 мм.

В стыковых соединениях без скоса свариваемых кромок с зазором намного легче, чем в стыковых соединениях без зазора, обеспечить полный провар. Это позволяет производить сварку металла большей толщины. Следует отметить, что в случае получения непровара прочность стыкового соединения будет такой же, как и соединения без зазора. В случае приложения достаточной нагрузки эти сварные соединения будут иметь одинаковую вероятность разрушения. При сварке односторонним швом полное проплавление достигается при толщине металла менее 5 мм. При

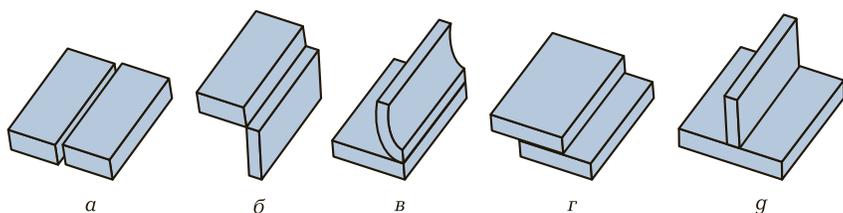


Рис. 1.1. Основные виды соединений:

*a* — стыковое; *б* — угловое; *в* — торцовое; *г* — нахлесточное; *д* — тавровое

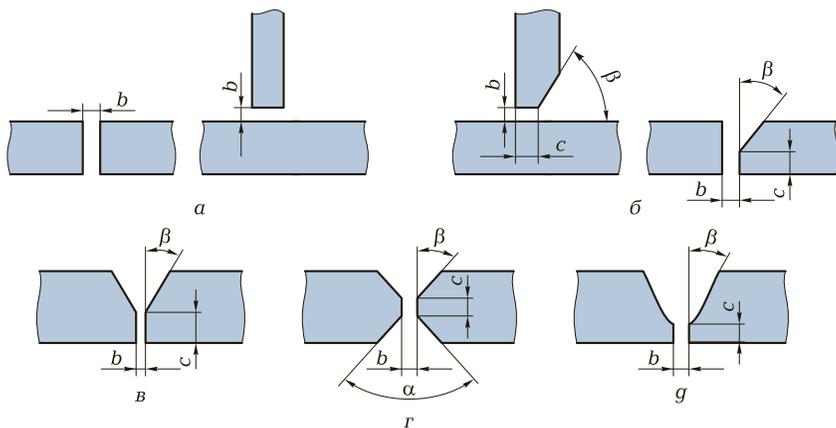


Рис. 1.2. Конструктивные элементы разделки кромок под сварку:

*a* — без разделки кромок; *б* — с разделкой кромок одной детали; *в* — V-образная разделка; *г* — X-образная разделка; *д* — U-образная разделка; *b* — зазор; *c* — притупление;  $\beta$  — угол скоса кромок;  $\alpha$  — угол разделки кромок

сварке двухсторонним швом полное проплавление обеспечивает при толщине металла до 12 мм.

*Стыковое соединение со скосом кромок* — наиболее распространенное соединение. Оно намного превосходит по качеству шва стыковое соединение без скоса кромок и применяется для сварки ответственных конструкций. Стыковые соединения со скосом кромок позволяют сваривать металл толщиной 3...100 мм. Стоимость подготовки таких соединений и расход электродов при их сварке превышают аналогичные показатели для стыковых швов без скоса свариваемых кромок.

При сварке односторонним швом необходимо обеспечить гарантированный провар корня шва (рис. 1.3, *а*), в противном случае в условиях приложения значительной нагрузки может произойти разрушение соединения.

Двухсторонний сварной шов (рис. 1.3, *б*) может производиться только в тех случаях, когда имеется возможность доступа к обратной стороне шва: при этом гораздо легче обеспечить гарантированный провар на всю толщину сварного соединения. При использовании подкладок (рис. 1.3, *в*) появляется возможность повысить скорость сварки и применять электроды большего диаметра, особенно при выполнении первого или корневого прохода.

*Стыковые соединения с двумя симметричными скосами кромок* применяются для конструкций, работающих в исключительно тяжелых условиях эксплуатации. Они используются для получения сварных соединений металла толщиной 8...120 мм.

При выполнении стыкового соединения с двумя симметричными скосами кромок (рис. 1.4) необходимо обеспечить гарантированный провар корня шва. Для этого перед наложением второго шва нужно произвести зачистку корня первого шва.

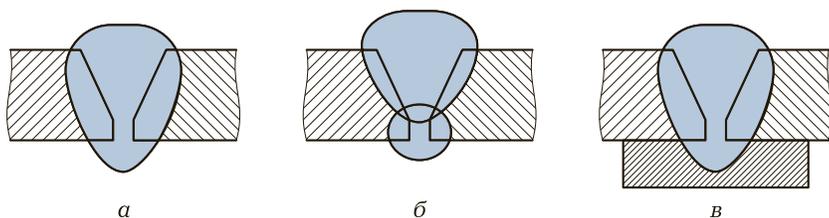
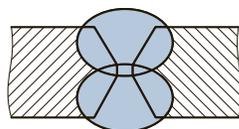


Рис. 1.3. Стыковое соединение со скосом кромок:

*а* — стыковое соединение с полным проваром; *б* — двухсторонний сварной шов; *в* — стыковое сварное соединение с полным проваром на подкладке

Рис. 1.4. Стыковое соединение с двумя симметричными скосами кромок



Сварка двухсторонним швом стыкового соединения с двумя симметричными скосами кромок позволяет достичь более равномерного распределения теплоты в соединении, что снижает концентрацию напряжений в свариваемом изделии.

Кроме того, такая разделка обеспечивает меньшую величину деформаций после сварки.

Стыковые соединения со скосом одной кромки (рис. 1.5, а—в) и двумя симметричными скосами одной кромки (рис. 1.5, г) могут применяться в конструкциях, силовые нагрузки на которые, а также толщина металла сходны с конструкциями, для которых используются стыковые соединения со скосом кромок.

Стыковое соединение с криволинейным скосом кромок применяется для особо ответственных конструкций, таких как нагреваемые сосуды высокого давления. Стоимость выполнения таких соединений выше, чем стоимость выполнения соединений со скосом кромок и соединений с двумя симметричными скосами кромок, однако для сварки соединений с криволинейным скосом кромок необходимо меньшее количество электродов и, соответственно, меньший расход электроэнергии. Стыковое соединение с криволинейным скосом кромок применяется для сварки металла толщиной 15...100 мм.

Полное сплавление корня шва легче обеспечить при сварке соединения с двух сторон (рис. 1.6, а) и при сварке соединения на подкладке (рис. 1.6, б), чем при сварке односторонним швом (рис. 1.6, в).

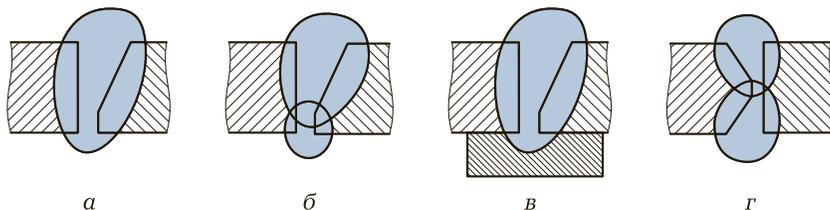


Рис. 1.5. Стыковое соединение со скосом одной кромки [а—в) и двумя симметричными скосами одной кромки [г)

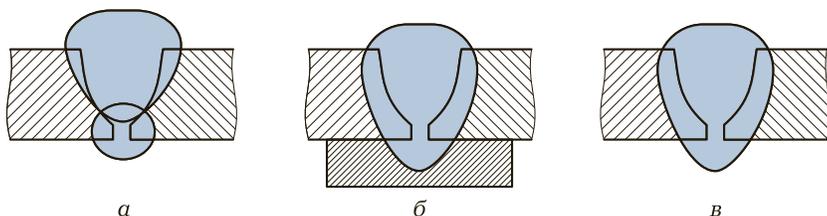


Рис. 1.6. Стыковое соединение с криволинейным скосом кромок:  
 а — двухсторонним сварным швом; б — с полным проваром на подкладке; в — с полным проваром

Для получения необходимых эксплуатационных свойств такого соединения необходимо гарантированное проплавление корня сварного шва.

Стыковое соединение с двумя симметричными криволинейными скосами кромок применяется для конструкций, в которых используется разделка с криволинейным скосом кромок; при этом сваривается металл большей толщины и сварка производится с двух сторон. Толщина свариваемого металла — от 30 до 175 мм. Внешний вид данного соединения показан на рис. 1.7.

Стыковые соединения с криволинейным скосом одной кромки (рис. 1.8, а—в) и двумя симметричными криволинейными скосами одной кромки (рис. 1.8, г) применяются в тех же случаях, что и стыковые соединения с двумя симметричными криволинейными скосами кромок, но в условиях приложения меньших нагрузок.

**Угловое соединение** — это сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краев (рис. 1.9).

Угловые соединения осуществляют, располагая свариваемые элементы под прямым или произвольным углом; сварка выполняется по кромкам этих элементов с одной или обеих сторон.

Угловые соединения применяют при сварке различных коробчатых изделий, резервуаров и емкостей.

Угловое соединение без скоса кромок с торцевым швом (рис. 1.10, а) обычно применяют для сварки тонкого металла. Более

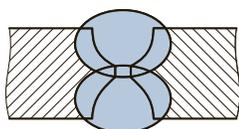


Рис. 1.7. Стыковое соединение с двумя симметричными криволинейными скосами кромок

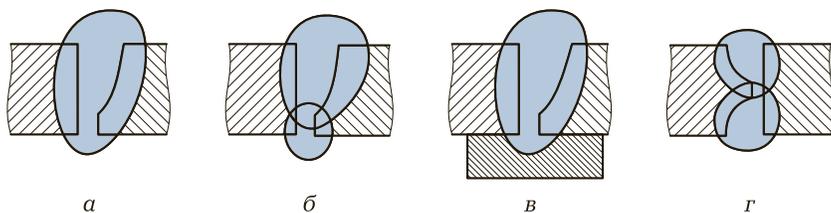


Рис. 1.8. Стыковое соединение с криволинейным скосом одной кромки (а–в) и двумя симметричными криволинейными скосами одной кромки (г)

толстые соединения могут выполняться таким способом только в том случае, если во время эксплуатации они не будут подвергаться значительным нагрузкам или изгибу в корневой части шва. Для получения данного типа соединения не требуется никакой подготовки кромок. Сборка таких соединений предельно проста.

Угловое соединение без скоса кромок с частичным перекрытием элементов (рис. 1.10, б) может применяться для металла толщиной до 30 мм.

Данное соединение образует разделку и позволяет обеспечить качественное проплавление в корне шва, а также хороший внешний вид сварного шва.

Угловое соединение без скоса кромок без взаимного перекрытия элементов (рис. 1.10, в) может быть использовано для сварки металла большой толщины. При односторонней сварке необходимо обеспечивать проплавление корня шва. При двухсторонней сварке такое соединение может выдержать значительные нагрузки, поскольку в нем равномерно распределены сварочные напряжения. Кромки торцов должны быть перпендикулярны после обрезки; для сборки необходимы соответствующие зажимы и кондукторы.

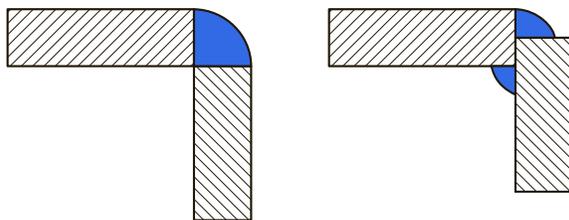


Рис. 1.9. Угловое соединение

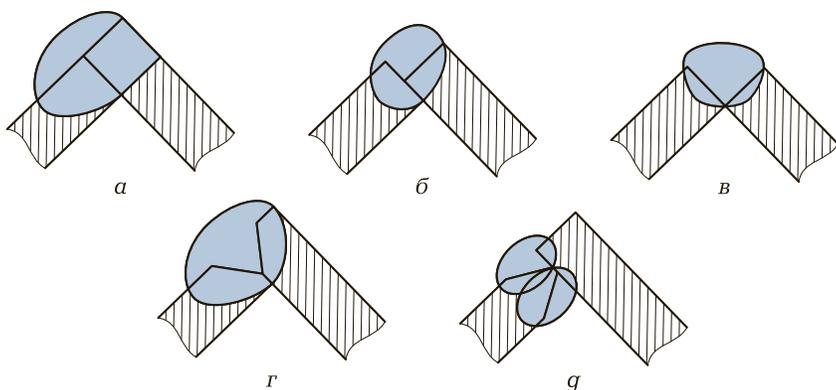


Рис. 1.10. Виды угловых соединений:

*а* — без скоса кромок с торцовым швом; *б* — без скоса кромок с частичным перекрытием элементов; *в* — без скоса кромок без взаимного перекрытия элементов; *г* — со скосом кромок; *д* — с двумя симметричными скосами одной кромки

Угловое соединение со скосом кромок (рис. 1.10, *г*) обладает большой прочностью и применяется для сварки металла толщиной 3...60 мм. При невозможности двухсторонней сварки следует обращать внимание на провар корня шва. Стоимость подготовки углового соединения со скосом кромок выше, чем без скоса кромок и без взаимного перекрытия.

Угловое соединение с двумя симметричными скосами одной кромки (рис. 1.10, *д*) применяют для конструкций, работающих в тяжелых условиях, при толщине металла 8...100 мм. Сварку выполняют с двух сторон; при этом необходимо обеспечивать хорошее проплавление в корне шва.

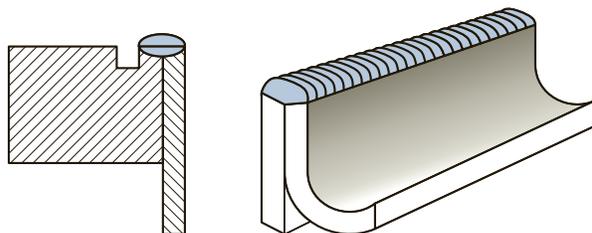


Рис. 1.11. Торцовое соединение

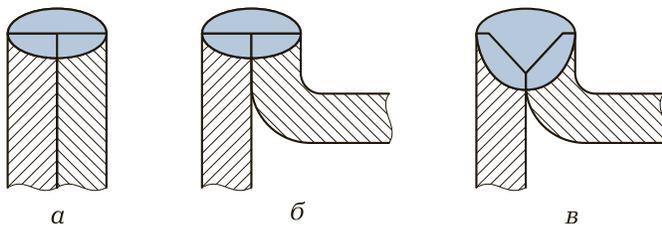


Рис. 1.12. Торцовые соединения:

*а* — обычное; *б* — с отгибом одной кромки; *в* — со скосом кромок

**Торцовое соединение** — это сварное соединение, в котором боковые поверхности сваренных элементов примыкают друг к другу (рис. 1.11).

Торцовые соединения не предназначены для нагруженных элементов конструкций и не должны использоваться в сварных изделиях, подвергаемых растяжению или изгибу в корневой части. Очень глубокое проплавление для данного соединения невозможно (рис. 1.12, *а*, *б*). Иногда для увеличения глубины проплавления применяют торцовые соединения со скосом кромок (рис. 1.12, *в*). Торцовые соединения обычно применяют для металлов толщиной до 6 мм.

**Нахлесточное соединение** — это сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 1.13).

При обычных работах применяют нахлесточное соединение с одним угловым швом (рис. 1.13, *а*), хотя оно менее прочно, чем нахлесточное соединение с двумя угловыми швами (рис. 1.13, *б*). В случае если корень соединения будет подвергаться изгибу, применять нахлесточное соединение с одним угловым

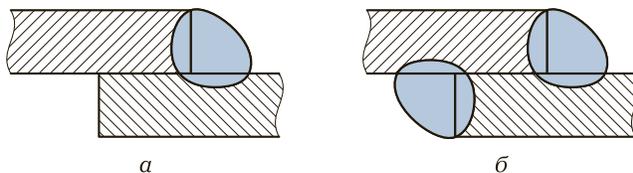


Рис. 1.13. Виды нахлесточных соединений:

*а* — с одним угловым швом; *б* — с двумя угловыми швами

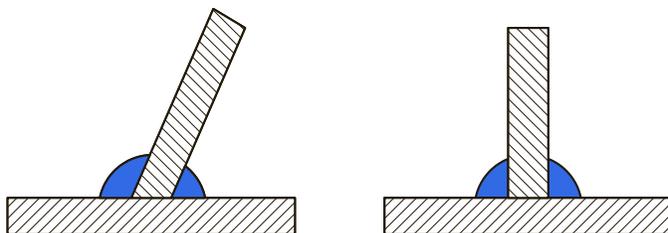


Рис. 1.14. Тавровые соединения

швом не рекомендуется. При сварке угловых швов нахлесточного соединения необходимо обеспечивать провар корня шва. Нахлесточные соединения применяются широко, но при больших нагрузках все же не могут конкурировать со стыковыми соединениями.

**Тавровое соединение** — это сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (рис. 1.14).

*Тавровые соединения без скоса кромок* (рис. 1.15, а, б) могут применяться при сварке металла толщиной до 40 мм. Эти соединения не требуют какой-либо подготовки кромок, их сборка проста и экономична. Тавровое соединение с двухсторонним швом (рис. 1.15, в) способно противостоять значительным нагрузкам. Тавровые соединения с односторонним швом (см. рис. 1.15, а) плохо работают на изгиб относительно корня шва, поэтому применять их следует с осторожностью.

*Тавровые соединения со скосом одной кромки* обладают большей прочностью, чем тавровые соединения без скоса кромок. Тавровое соединение со скосом кромок используется для сварки металла толщиной 3...60 мм.

При невозможности двухсторонней сварки (см. рис. 1.15, в) следует обращать внимание на обеспечение полного провара в корневой части шва; в этом случае соединение сможет работать на изгиб. При наличии возможности проведения двухсторонней сварки (рис. 1.15, г) несущая способность соединения значительно увеличивается.

*Тавровые соединения с двумя симметричными скосами одной кромки* (рис. 1.15, г) применяются для конструкций, работающих в тяжелых условиях, для металла толщиной 8...100 мм. Сварка выполняется с двух сторон; необходимо обеспечивать хорошее проплавление в корне шва.

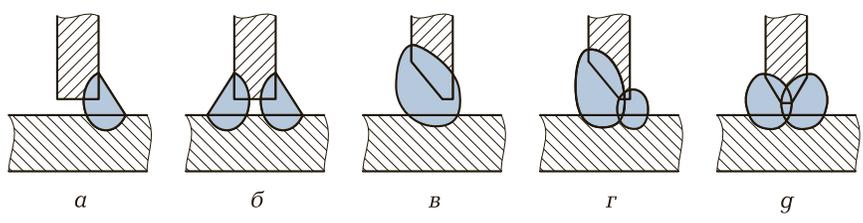


Рис. 1.15. Тавровые соединения без скоса кромок (а, б), со скосом одной кромки (в, г) и двумя симметричными скосами одной кромки (д)

Тавровые соединения с криволинейным скосом одной кромки используются в наиболее жестких условиях эксплуатации, при толщине металла 15...100 мм. При выполнении односторонней сварки следует обращать внимание на обеспечение полного провара в корневой части шва (рис. 1.16, а). При наличии возможности проведения двухсторонней сварки (рис. 1.16, б) эффективность работы соединения можно существенно повысить за счет наложения второго шва со стороны неразделанной кромки. В этом случае значительно уменьшится вероятность разрушения данного соединения в результате приложения нагрузки к нему в области корня шва.

Тавровые соединения с двумя симметричными криволинейными скосами одной кромки (рис. 1.16, в) могут выдержать самые жесткие условия нагружения. Их применяют для металла толщиной 30...120 мм. Сварщику необходимо обеспечивать двухстороннюю сварку соединения. Для получения высоких прочностных характеристик в условиях значительных нагрузок необходимо наличие хорошего провара в корневой части шва и сплавления с поверхностью.

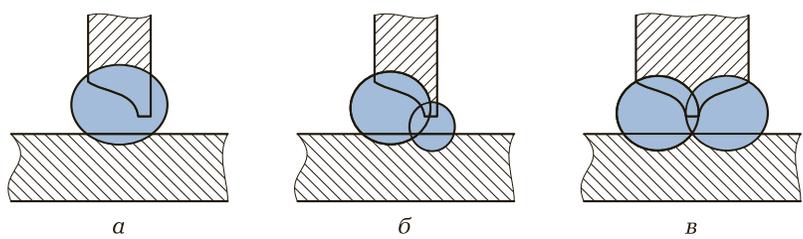


Рис. 1.16. Тавровые соединения с криволинейным скосом одной кромки (а, б) и двумя симметричными криволинейными скосами одной кромки (в)

## 1.2. ТИПЫ СВАРНЫХ ШВОВ

*Сварным швом* называется участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла или пластической деформации при сварке давлением или сочетания кристаллизации и деформации. Сварные швы классифицируют по назначению, конструктивному признаку, протяженности, положению относительно действующей силы и положению в пространстве.

По **назначению** швы подразделяются на рабочие и связующие (конструктивные). Рабочие швы воспринимают расчетные усилия (их размеры определяются расчетом). Конструктивные (связующие) швы служат для соединения элементов, прикрепления конструктивных деталей, устранения зазоров и выполняются минимального сечения.

По **конструктивному признаку** швы подразделяются на стыковые, угловые, наплавочные и точечные.

*Стыковой шов* — это сварной шов стыкового соединения. Стыковые швы выполняются при соединении элементов, расположенных обычно в одной плоскости, путем заполнения присадочным материалом пространства между деталями. При сварке элементов небольшой толщины для полного провара достаточно оставить между кромками зазор, равный  $1/3$  толщины металла, при этом стыковой шов может быть как на остающейся (рис. 1.17, а), так и на съемной (рис. 1.17, б) подкладке.

При большой толщине металла, чтобы достичь хорошего провара по всей глубине шва, необходимо специально обработать кромки свариваемых элементов — произвести разделку кромок. При этом шов может состоять из одного или нескольких валиков, наплавленных вразделку (рис. 1.18).

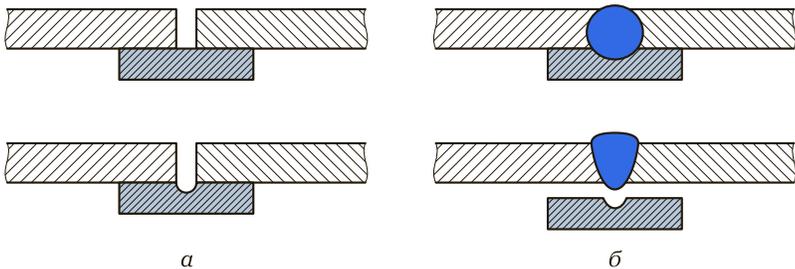


Рис. 1.17. Стыковой шов на остающейся [а] и съемной [б] подкладке

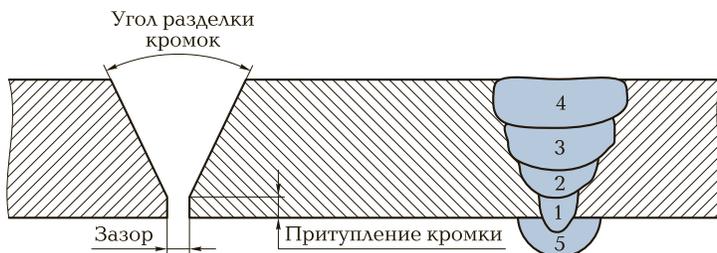


Рис. 1.18. Стыковой шов с разделкой кромок:

1 — корневой проход; 2–4 — заполняющие слои; 5 — подварочный шов

Валиком называется металл сварного шва, наплавленный или переплавленный за один проход. Первый валик (рис. 1.18), наплавленный в разделку, называется корневым проходом, или корневым швом. Последующие валики образуют заполняющие слои. При сварке двухсторонним швом меньшая часть двухстороннего шва, выполняемая предварительно для предотвращения прожогов при последующей сварке или накладываемая в последнюю очередь в корень шва, называется подварочным швом.

Стыковые швы должны иметь с обеих сторон выпуклость в виде наплывов, имеющих плавное очертание, и по возможности небольшую высоту. Выпуклость компенсирует неровность наружной поверхности шва и возможные ослабления (поры, шлаковые включения) внутренней части.

Стыковой шов является основным и наиболее экономичным сварным соединением. Он передает усилие равномерно по всему сечению с наименьшими местными напряжениями, что обуславливает его целесообразность при вибрационной и динамической нагрузках. Недостатками стыкового шва являются: производственные трудности в осуществлении равномерного зазора по всей длине соединяемых элементов; дополнительные расходы на обработку кромок; необходимость точной резки элементов.

*Угловой шов* — это сварной шов углового, нахлесточного или таврового соединения. Угловые швы накладываются в угол, образованный соединяемыми элементами, расположенными в разных плоскостях, и могут состоять из одного или нескольких валиков (рис. 1.19).

Нормальный угловой шов имеет вид равнобедренного треугольника с небольшой выпуклостью. В соединениях, восприни-

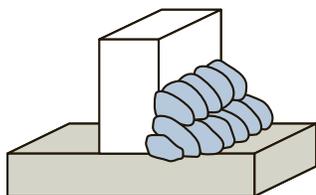


Рис. 1.19. Угловой шов, образованный несколькими валиками

обладающих динамическими усилиями, угловые швы должны иметь вогнутую поверхность. Стандартом допускаются выпуклость и вогнутость углового шва до 30 % от размера его катета; при этом вогнутость не должна приводить к уменьшению значения катета  $K_n$  (размер катета углового шва, установленный при проектировании). Проектной величиной катета  $K_n$  является катет наибольшего прямоугольного треугольника, вписанного во внешнюю часть углового шва (рис. 1.20). При симметричном шве за катет  $K_n$  принимается любой из равных катетов, при несимметричном шве — меньший.

*Точечный шов* — это сварной шов, в котором связь между сваренными частями осуществляется сварными точками. Сварная точка — это элемент точечного шва, представляющий собой в плане круг или эллипс.

Точечные швы применяются для сварки нахлесточных соединений с отверстием в верхнем элементе (рис. 1.21). Отверстие может быть с вертикальными стенками или иметь скос кромки. Данный тип сварных швов не получил широкого распространения.

По **протяженности** сварные швы подразделяются на непрерывные, прерывистые и прихватки.

*Непрерывный шов* — это сварной шов без промежутков по длине. Непрерывный шов проходит по всей длине соединения (от одного конца к другому). В конструкциях, предназначенных для

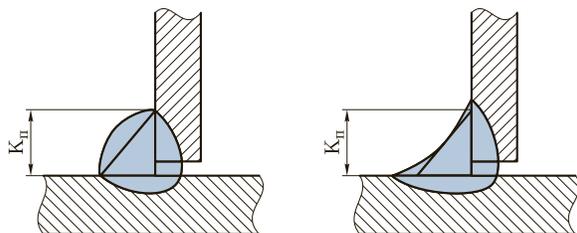
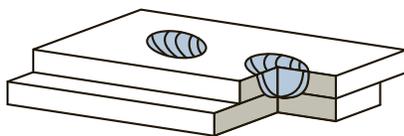


Рис. 1.20. Проектная величина катета  $K_n$  угловых швов

Рис. 1.21. Точечный шов нахлесточного соединения



печивать максимальную прочность и герметичность, все швы следует выполнять непрерывными.

*Прерывистый шов* — это сварной шов с промежутками по длине (рис. 1.22). Прерывистые швы не применяют в тех случаях, когда от конструкции требуется максимальная прочность или герметичность, однако в неответственных конструкциях (сварка ограждений, настила и т.п.) использование прерывистых швов может дать ощутимый экономический эффект, а стоимость сварочных работ может быть значительно снижена.

Прерывистый шов обычно применяется для сварки нахлесточных и тавровых соединений. Иногда прерывистые швы используются для стыковых соединений без разделки кромок и практически никогда не применяются для стыковых соединений с разделкой кромок. Разновидностями прерывистых швов являются цепной прерывистый шов и шахматный прерывистый шов.

Цепной прерывистый шов — это двухсторонний прерывистый шов, у которого промежутки расположены по обеим сторонам стенки, один напротив другого (рис. 1.23, а).

Шахматный прерывистый шов — это двухсторонний прерывистый шов, у которого промежутки на одной стороне расположены напротив сваренных участков шва с другой ее стороны (рис. 1.23, б).

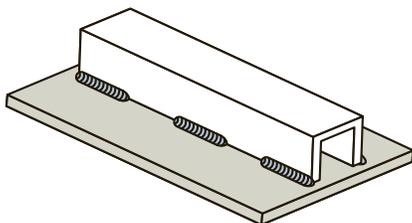


Рис. 1.22. Прерывистый шов

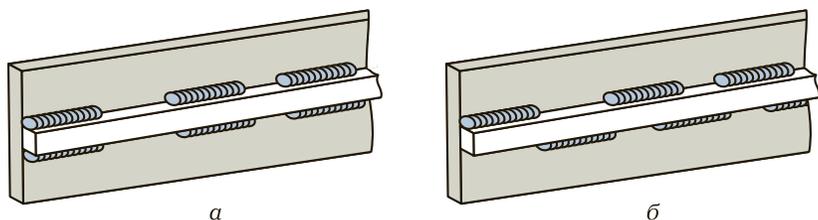


Рис. 1.23. Цепной прерывистый (а) и шахматный прерывистый (б) швы

*Прихватка* — это короткий сварной шов для фиксации взаимного расположения подлежащих сварке деталей. В процессе сборки возникает необходимость присоединения какого-то элемента к основной конструкции перед его сваркой. Это обеспечивается путем наложения серии коротких швов, расположенных друг от друга на некотором расстоянии.

Прихватки должны быть достаточно прочными, для того чтобы удерживать элемент в нужном положении и не разрушиться под действием деформаций, возникающих при сварке. Количество и сечение прихваток определяются толщиной свариваемого металла, протяженностью шва, нагрузкой от холодной обработки, которую придется выдержать прихваткам, а также от применяемой технологии сварки. Прихватки должны иметь хорошее проплавление в корневой части шва, хорошее сплавление с кромками, ровную и плоскую поверхность, не должны иметь выпуклостей и бугристостей на наружной поверхности. Прихватки рекомендуется выполнять с повышенным тепловложением.

По положению относительно действующей силы сварные швы подразделяются на фланговые, лобовые и косые (рис. 1.24).

Лобовой стыковой шов передает приложенное усилие  $P$  равномерно по всему сечению с наименьшими местными напряжениями. Прочность соединения не зависит от типа разделки кромок свариваемых элементов и при правильном производстве работ практически одинакова.

При превышении допустимых пределов нагрузки разрушение стыкового соединения может произойти как по шву, так и по основному металлу, поскольку наплавленный металл может не уступать по прочности основному.

Лобовой двухсторонний угловой шов нахлесточного соединения в большинстве случаев имеет неравномерное распределение нагрузки.

Наибольшее срезающее напряжение как лобовых, так и фланговых швов приходится на минимальное сечение шва, проходящее по биссектрисе угла шва; по этому сечению обычно и происходит разрушение угловых швов. При расчетах на срез по опасному сечению толщину углового шва принимают равной  $0,7K$ , где  $K$  — катет углового шва.

Статическая прочность фланговых швов несколько меньше, чем лобовых. Пластические свойства фланговых швов незначительны, и после появления у начала шва первой трещины разрушение происходит достаточно быстро.

При соединении лобовыми швами необходимо стремиться к осуществлению двухсторонней заварки. Нахлесточное соединение с односторонним швом имеет пониженную прочность вследствие большого влияния эксцентриситета.

При выполнении нахлесточных соединений только фланговыми швами необходимо, чтобы длина шва была больше ширины детали. При невозможности выполнения этого условия производят обварку по контуру как лобовыми, так и фланговыми швами. Обварка по контуру повышает прочность соединения по сравнению с лобовыми или фланговыми швами, но пересечение лобовых и фланговых швов — понижает. В углах швов создается по-

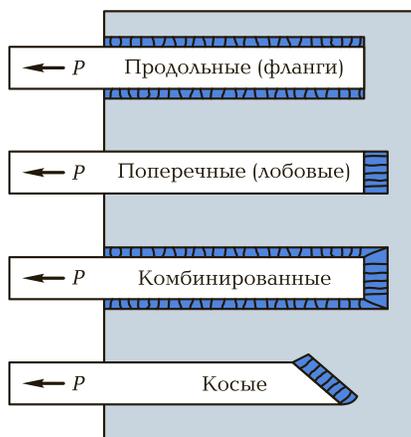


Рис. 1.24. Типы сварных швов по отношению к направлению действующих на них усилий

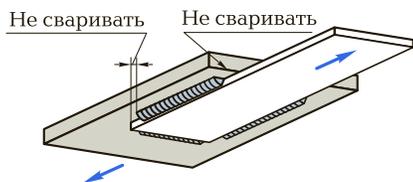


Рис. 1.25. Обварка детали по контуру

вышенная концентрация напряжений, поэтому при обварке по контуру их желательнее не обваривать (рис. 1.25).

В конструкциях, работающих под регулярным воздействием подвижных или вибрационных нагрузок, лобовые швы должны быть пологими, а фланговые — вогнутыми.

По **положению в пространстве** различают следующие типы сварочных швов (рис. 1.26): нижнее стыковое и «в лодочку»; нижнее тавровое; горизонтальное; потолочное стыковое; потолочное тавровое; вертикальное снизу вверх; вертикальное сверху вниз; наклонное под углом  $45^\circ$ .

Равновесие сварочной ванны в различных пространственных положениях определяется в основном действием трех сил: давления дуги, поверхностного натяжения жидкого металла сварочной ванны и силы тяжести сварочной ванны.

*Нижнее положение сварки* — положение, когда плоскость, в которой расположен шов сварного соединения, находится под

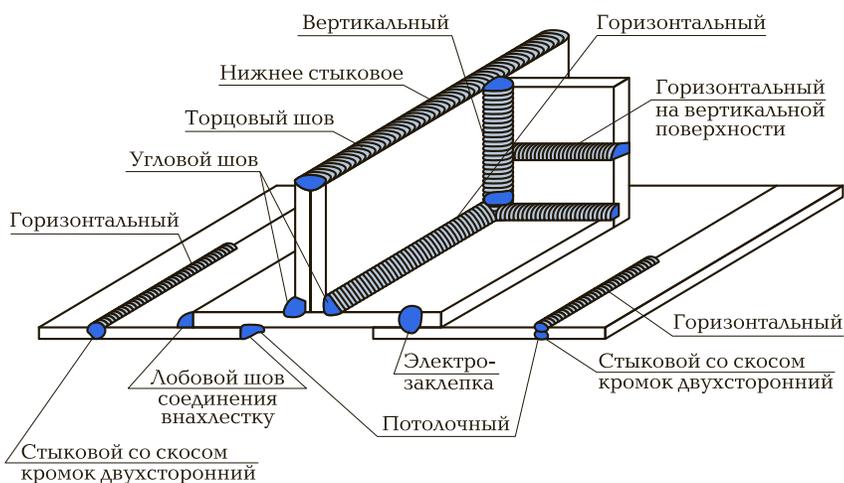


Рис. 1.26. Положение в пространстве различных видов сварочных швов

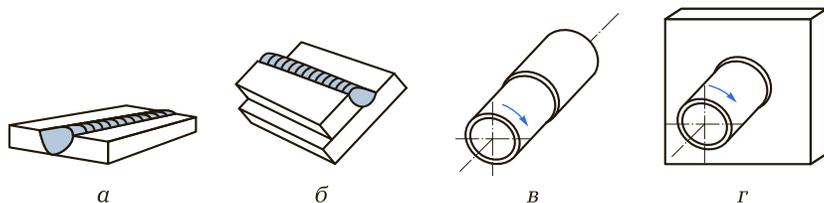


Рис. 1.27. Положение при сварке стыковых и тавровых швов:

*а* — нижнее стыковое; *б* — «в лодочку»; *в*, *г* — нижнее при горизонтальном расположении осей труб, свариваемых с поворотом

углом от  $0$  до  $10^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 1.27, 1.28).

При сварке в нижнем положении поверхность сварочной ванны занимает горизонтальное положение, что создает наиболее благоприятные условия для формирования шва, так как жидкий металл удерживается на свариваемой поверхности под действием силы поверхностного натяжения.

*Горизонтальное положение сварки* — положение, при котором шов сварного соединения расположен на вертикальной поверхности и находится под углом от  $0$  до  $10^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 1.29).

*Вертикальное положение сварки* — положение, при котором шов сварного соединения находится на вертикальной плоскости под углом  $(90 \pm 10)^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости.

*Сварка «на подъем»* — это сварка плавлением в наклонном положении, при котором сварочная ванна перемещается снизу вверх.

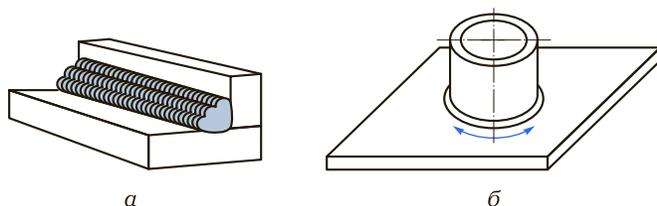


Рис. 1.28. Положение при сварке тавровых швов:

*а* — нижнее тавровое; *б* — нижнее при вертикальном расположении оси трубы, привариваемой без поворота или с поворотом

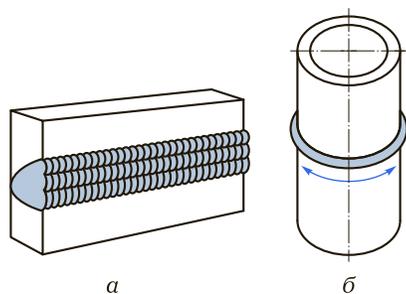


Рис. 1.29. Положение при сварке стыковых швов:

*a* — горизонтальное; *б* — горизонтальное при вертикальном расположении осей труб, свариваемых без поворота или с поворотом

*Сварка «на спуск»* — это сварка плавлением в наклонном положении, при котором сварочная ванна перемещается сверху вниз.

Сварка в вертикальном положении сверху вниз и «на спуск» характеризуется тем, что направление силы тяжести жидкого металла и направление сварки совпадают. Металл сварочной ванны подтекает под столб дуги, что уменьшает глубину проплавления. При сварке в вертикальном положении снизу вверх и «на подъем» направление силы тяжести жидкого металла противоположно направлению сварки; металл сварочной ванны вытекает из-под столба дуги, увеличивая при этом глубину проплавления.

*Наклонное положение сварки* — положение, при котором плоскость, на которой располагается сварной шов, находится под углом  $(45 \pm 10)^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости.

*Потолочное положение сварки* — такое пространственное положение при сварке, при котором сварка выполняется снизу соединения. При потолочном положении сварки поверхность сварочной ванны занимает горизонтальное положение и металл ванны удерживается силами поверхностного натяжения и давления дуги.

Сварка в нижнем положении наиболее удобна и обеспечивает повышение скорости сварки, возможность применения электродов большего диаметра, обеспечивает лучшее качество шва и внешний вид сварных швов, поэтому при проектировании необходимо предусматривать возможность сварки наибольшего количества нижних швов.

Потолочные швы расположены в горизонтальной плоскости, но накладываются снизу. Такая сварка наиболее трудна и может

осуществляться только высококвалифицированными сварщиками, поэтому при проектировании ее по возможности следует избегать.

Сварка в вертикальном и потолочном пространственных положениях используется главным образом на тех предприятиях, где продукция крупногабаритная и не подлежит повороту.

### 1.3. ПАРАМЕТРЫ СВАРНЫХ ШВОВ

Конструктивные элементы и размеры сварных соединений зависят от типа соединения, толщины свариваемого металла, способа и режима сварки.

Стыковой сварной шов с разделкой кромок характеризуется формой разделки. На тех участках, где стыкуемые кромки имеют разную толщину, толщиной сварного шва будет меньшая из толщин. Наплавленный металл, выступающий над поверхностью свариваемых деталей, называется *выпуклостью шва*.

Выпуклость сварного шва определяется расстоянием между плоскостью, проходящей через видимые линии границы сварного шва с основным металлом, и поверхностью сварного шва, измеренным в месте наибольшей выпуклости (рис. 1.30). Избыточная выпуклость является фактором, уменьшающим эксплуатационную прочность сварного шва.

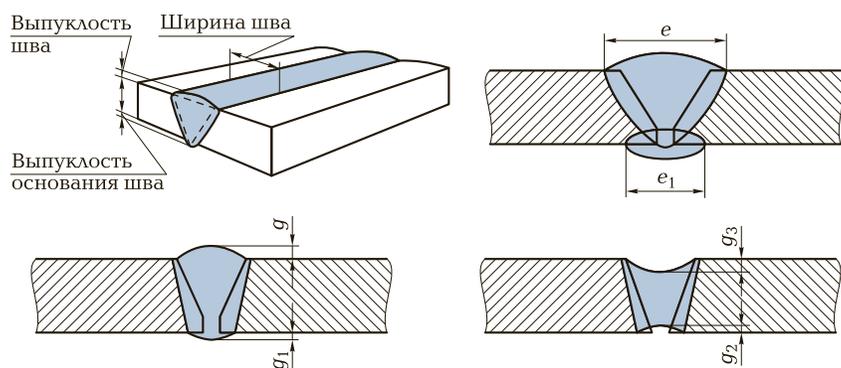


Рис. 1.30. Конструктивные элементы стыкового сварного шва:

$e, e_1$  — ширина шва;  $g, g_1$  — выпуклость шва;  $g_2, g_3$  — вогнутость шва

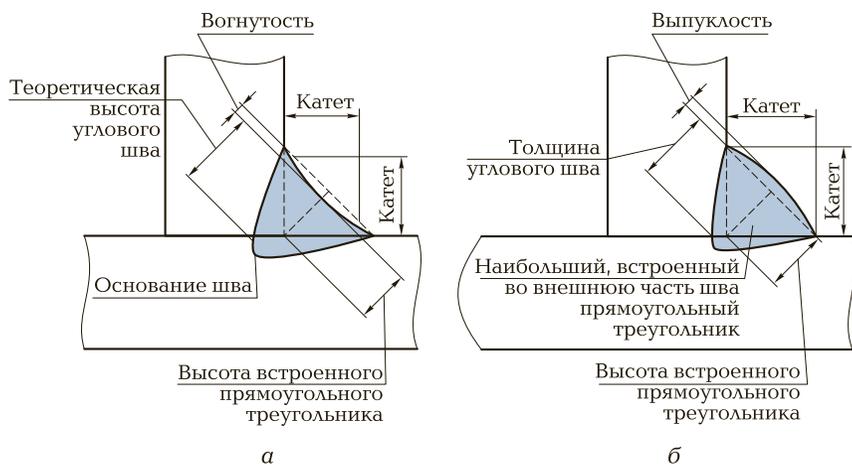


Рис. 1.31. Конструктивные элементы вогнутого (а) и выпуклого (б) угловых швов

Вогнутость углового и стыкового сварного шва или корня шва стыкового соединения приведет к уменьшению высоты шва и получению шва с уменьшенным сечением. Вогнутость сварного шва определяется расстоянием между плоскостью, проходящей через видимые линии границы шва с основным металлом, и поверхностью шва, измеренным в месте наибольшей вогнутости (рис. 1.31).

Ширина стыкового сварного шва не должна превышать допустимые пределы, указанные в соответствующих ГОСТах. Ориентировочно принимают ширину шва на 6 мм шире разделки с лицевой стороны соединения.

Размеры угловых швов обычно задаются через катет углового шва. *Катет углового шва* — это кратчайшее расстояние от поверхности одной из свариваемых частей до границы углового шва на поверхности второй свариваемой части (см. рис. 1.31).

При сварке с глубоким проплавлением размер угловых швов определяют через расчетную величину углового шва. *Расчетная высота углового шва* — это длина перпендикуляра, опущенного из точки максимального проплавления в месте сопряжения свариваемых частей на гипотенузу наибольшего вписанного во внешнюю часть углового шва прямоугольного треугольника (см. рис. 1.31).

В некоторых случаях за основу параметров углового шва принимают толщину углового шва. *Толщина углового шва* — это наибольшее расстояние от поверхности углового шва до точки максимального проплавления основного металла (рис. 1.32).

В стыковых соединениях основными критериями являются высота шва и провар. *Провар* — это сплошная металлическая связь между свариваемыми поверхностями основного металла, слоями и валиками сварного шва. *Корень шва* — это часть сварного шва, наиболее удаленная от его лицевой поверхности.

При больших толщинах свариваемого металла для улучшения провара применяют скос кромок. *Скос кромки* — это прямолинейный наклонный срез кромки, подлежащей сварке (рис. 1.33). Наклон среза кромки определяется углом скоса кромки. *Угол скоса кромки* — это острый угол между плоскостью скоса кромки и плоскостью торца.

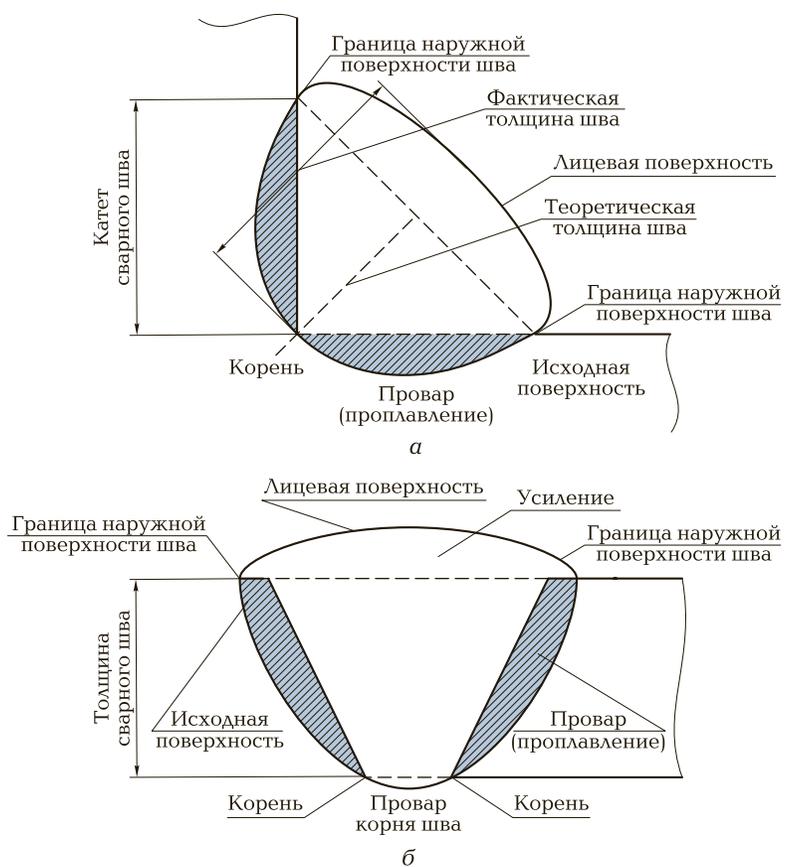


Рис. 1.32. Конструктивные элементы углового (а) и стыкового (б) сварных швов

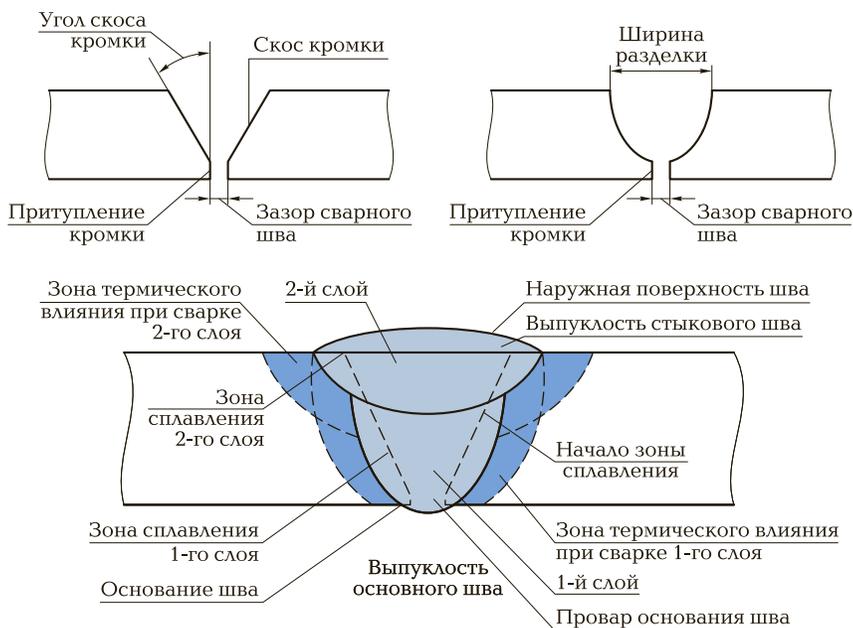


Рис. 1.33. Конструктивные элементы стыкового шва

Для уменьшения вероятности прожога корня шва применяют разделку с притуплением кромки. *Притупление кромки* — это нескошенная часть торца кромки, подлежащей сварке.

Для улучшения провара корня шва сборку свариваемых деталей производят с зазором.

*Зазор* — это кратчайшее расстояние между кромками собранных для сварки деталей.

## 1.4. УСЛОВНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ШВОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

ЕСКД ГОСТ 2.312—72 устанавливает условные изображения и обозначения швов сварных соединений в конструкторских документах изделий всех отраслей промышленности, а также в строительной документации, в которой не использованы изображения и обозначения, применяемые в строительстве.

По ГОСТ 2.312—72 швы сварных соединений независимо от способа сварки условно изображают следующим образом:

- видимый шов — сплошной основной линией;
- невидимый шов — штриховой линией;
- видимую одиночную сварную точку независимо от способа сварки — знаком «+», который выполняют сплошными линиями;
- невидимые одиночные точки — не изображают.

От изображения шва или одиночной точки проводят линию-выноску, заканчивающуюся односторонней стрелкой. Линию-выноску обычно проводится от видимого шва, при необходимости — от невидимой стороны шва.

На изображении сечения многопроходного шва контуры отдельных проходов обозначают прописными буквами русского алфавита. Шов, размеры конструктивных элементов которого стандартами не установлены (нестандартный шов), изображают с указанием размеров конструктивных элементов, необходимых для выполнения шва по данному чертежу. Границы шва на чертежах изображают сплошными основными линиями, а конструктивные элементы кромок в границах шва — сплошными тонкими линиями.

Условное обозначение шва наносят:

- на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва с лицевой стороны;
- под полкой линии-выноски, проведенной от изображения шва с оборотной стороны.

Обозначение шероховатости механически обработанной поверхности шва наносят на полке или под полкой линии-выноски после условного обозначения шва, указывают в таблице швов или приводят в технических требованиях чертежа (например: «Параметр шероховатости поверхности сварных швов...»). Если для шва сварного соединения установлен контрольный комплекс или категория контроля шва, то их обозначение обычно помещают под линией-выноской.

При наличии на чертеже одинаковых швов обозначение может быть нанесено у одного из изображений. От изображений остальных одинаковых швов проводят линии-выноски с полками. Всем одинаковым швам присваивают одинаковый номер, который наносят:

- на линии-выноске, имеющей полку с нанесенным обозначением шва;

- на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва, не имеющего обозначения, с лицевой стороны;
- под полкой линии-выноски, проведенной от изображения шва, не имеющего обозначения, с оборотной стороны.

Количество одинаковых швов может быть указано на линии-выноске, имеющей полку с нанесенным обозначением шва. Швы считаются одинаковыми, если:

- одинаковы их типы и размеры конструктивных элементов в поперечном сечении;
- к ним предъявляются одни и те же требования.

Если все швы на чертеже одинаковы и изображены с одной стороны (лицевой или обратной), то нумерация одинаковых швов может отсутствовать. При этом швы, не имеющие обозначений, отмечают линиями-выносками без полок.

Структура условного обозначения стандартного шва или стандартной одиночной сварной точки приведена на рис. 1.34, нестан-



Рис. 1.34. Структура условного обозначения стандартного шва

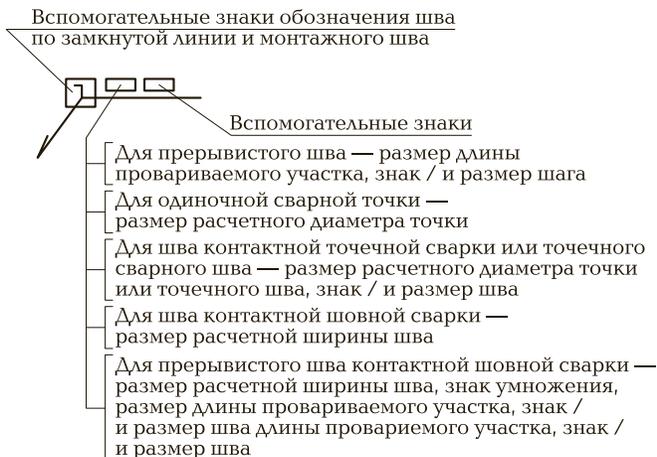


Рис. 1.35. Структура условного обозначения нестандартного шва или одиночной сварной точки

дартного шва или нестандартной одиночной сварной точки — на рис. 1.35.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое сварное соединение называется стыковым?
2. Чем отличается стыковое соединение от нахлесточного?
3. Какое сварное соединение называется тавровым?
4. Чем отличается угловое соединение от торцового?
5. Что называется сварным швом?
6. Какие разновидности сварных швов существуют?
7. К каким соединениям применим угловой шов?
8. Как подразделяются сварные швы по положению в пространстве?
9. Как подразделяются сварные швы по отношению к направлению действующих усилий?
10. Как классифицируются сварные швы по форме наружной поверхности?
11. Какими буквами обозначаются основные виды сварных соединений?
12. Какие конструктивные элементы характеризуют форму разделки кромок?
13. Какие формы разделки кромок вы знаете?
14. Какую роль выполняет зазор при сборке под сварку?

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

## 2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ЕЕ СТРОЕНИЕ

**Электрическая дуга** является разрядом в газах, при котором электрический ток проходит через газовый промежуток под воздействием электрического поля при наличии в нем заряженных частиц — электронов и ионов, возникающих в этом пространстве при эмиссии (испускании) электронов с поверхности отрицательного электрода (катода) и ионизации газов.

Энергию электрической дуги широко используют в сварке для получения сварных соединений, например в дуговой сварке плавлением. При сварке дуговой разряд может быть возбужден между свариваемым (основным) металлом и электродом (*дуга прямого действия*), между двумя электродами без включения свариваемой детали в цепь сварочного тока (*дуга косвенного действия*), между двумя электродами и свариваемой деталью (*комбинированная дуга*).

**Сварочная дуга** представляет собой электрический дуговой разряд в ионизированной смеси газов, а также паров металлов и компонентов, входящих в состав электродных покрытий, флюсов и т. д. Дуга является частью электрической сварочной цепи. При сварке на постоянном токе электрод, подсоединенный к положительному полюсу источника питания дуги, называют *анодом*, а электрод, подсоединенный к отрицательному полюсу, — *катодом*. Если сварку ведут на переменном токе, то каждый электрод попеременно служит то анодом, то катодом. Пространство между электродами называют *областью дугового разряда*, или *дуговым промежутком*, а длину этого промежутка — *длиной дуги*. Дуга, горящая между электродом и деталью, является дугой прямого действия.

По длине дугового промежутка можно выделить три области (рис. 2.1): катодную, анодную и находящийся между ними столб дуги.

**Катодная область** включает в себя нагретую поверхность катода (катодное пятно) и часть дугового промежутка, примыкающую к ней. Температура в пятне на стальных электродах достигает  $2\,400 \dots 2\,700 \text{ }^\circ\text{C}$ ; здесь выделяется до 38 % общей теплоты дуги. В катодной области происходит разгон электронов. Падение напряжения в ней  $U_k = 10 \dots 20 \text{ В}$ .

**Анодная область** состоит из анодного пятна на поверхности анода и части дугового промежутка, примыкающей к нему. Анодное пятно, являющееся местом входа и нейтрализации свободных электронов, имеет примерно такую же температуру, как и катодное пятно, но в результате бомбардировки электронами на нем выделяется больше теплоты, чем на катоде. Для дуг с плавящимся электродом анодное падение напряжения  $U_a = 2 \dots 6 \text{ В}$ .

**Столб дуги**, расположенный между катодной и анодной областями, имеет наибольшую протяженность в дуговом промежутке. Образующиеся в столбе заряженные частицы движутся к электродам: электроны — к аноду, а ионы — к катоду. Температура столба дуги изменяется в зависимости от плотности сварочного тока и может превышать  $8\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Напряжение дуги меняется вдоль столба в пределах  $10 \dots 50 \text{ В/см}$ . Величина напряжения зависит от состава газовой среды и уменьшается с введением в нее легкоионизирующихся компонентов (натрия, калия и др.).

Выделение тепловой и световой энергии в сварочной дуге происходит неравномерно. Электроны, достигшие анода, отдают ему свою энергию. Здесь образуется сильно нагретое «анодное пятно». Положительные ионы плазмы движутся к катоду и, отдавая

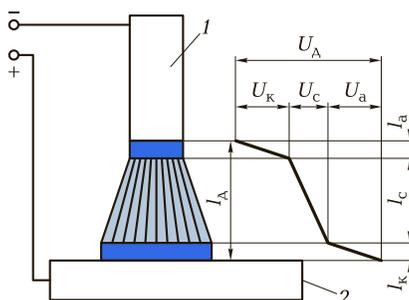


Рис. 2.1. Распределение падения напряжения в дуге:

1 — электрод; 2 — свариваемые детали;  $U_d$  — общее падение напряжения (напряжение дуги);  $l_d$  — длина дуги;  $U_k$ ,  $U_c$ ,  $U_a$  — составляющие падения напряжения в катодной области, столбе дуги и анодной области длиной  $l_k$ ,  $l_c$  и  $l_a$  соответственно

ему энергию, формируют так называемое катодное пятно. Необходимое условие существования дуги — поддерживаемая ионной бомбардировкой высокая температура катода, благодаря которой происходит эмиссия электронов, ионизирующих газ в столбе дуги.

Если дуга включена в цепь переменного тока низкой (промышленной) частоты, то в конце каждого полупериода подача тока прекращается, дуга гаснет. Однако в следующем полупериоде благодаря термоэмиссии электронов с не успевших остыть участков металла дуга возникает вновь, как только напряжение между электродами достигает значения, называемого напряжением зажигания. Чтобы добиться устойчивого горения дуги на переменном токе, необходимы определенные меры. Применяют, например, специальные электроды, в состав покрытия которых добавлены вещества с низким потенциалом ионизации.

Температура электрической дуги зависит от материала электродов: при угольных электродах на катоде она составляет около  $3\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на аноде — около  $3\,900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; при металлических электродах — соответственно  $2\,400$  и  $2\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В центре дуги у ее оси температура достигает  $6\,000\text{...}8\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Тепловая мощность дуги  $Q$ , Дж/с, определяется по формуле

$$Q = 0,24kI_{\text{св}}U_{\text{д}}, \quad (2.1)$$

где  $k$  — коэффициент снижения мощности дуги при сварке на переменном токе, равный  $0,70\text{...}0,97$ ;  $I_{\text{св}}$  — сварочный ток, А;  $U_{\text{д}}$  — напряжение на дуге, В;  $0,24$  — коэффициент перевода электрических величин в тепловые, Дж/(Вт·с).

При электродуговой сварке на нагревание и расплавление металла расходуется  $60\text{...}70\%$  теплоты. Остальное количество теплоты рассеивается в окружающем пространстве.

Образование дуги начинается с ее зажигания, которое может осуществляться одним из двух способов:

1) электрод приближается к заготовке на расстояние  $3\text{...}6$  мм, и в сварочную цепь на короткое время подключается источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (осциллятор);

2) зажигание дуги осуществляется в три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку; отвод электрода на  $3\text{...}6$  мм; возникновение устойчивого электрического разряда.

Второй способ является основным, а первый применяется только при сварке неплавящимся электродом.

При коротком замыкании (рис. 2.2, а) плотность тока в точках контакта достигает больших значений, и под действием выделяю-

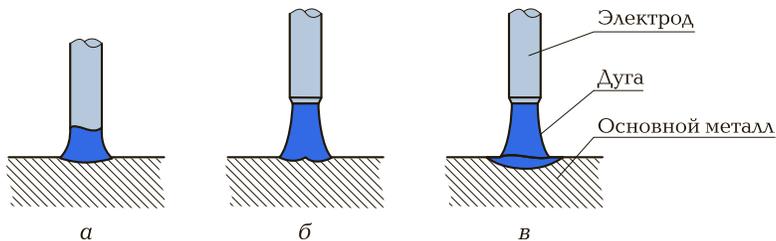


Рис. 2.2. Схема образования дуги:

*а* — короткое замыкание; *б* — образование прослойки из жидкого металла; *в* — образование шейки и возникновение дуги

щейся теплоты металл в этих точках мгновенно расплавляется, образуя жидкую перемычку между основным металлом и электродом (рис. 2.2, б). При отводе электрода от поверхности металла жидкая перемычка сначала растягивается, образуя шейку (рис. 2.2, в), а затем разрывается, после чего с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается термоэлектронная эмиссия электронов. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации. По мере разогрева столба дуги и повышения кинетической энергии атомов и молекул происходит дополнительная ионизация за счет их соударения. Отдельные атомы также ионизируются в результате поглощения энергии, выделяемой при соударении других частиц. В результате дуговой промежуток становится электропроводным и через него проходит разряд электрического тока (см. рис. 2.2, в). Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда.

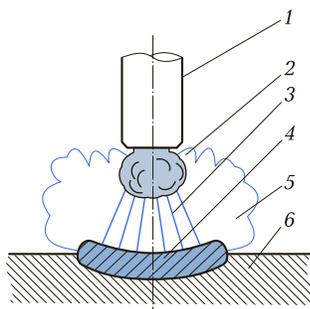


Рис. 2.3. Схема электрической сварочной дуги:

1 — электрод; 2 — капля расплавленного металла; 3 — дуговой разряд; 4 — сварочная ванна; 5 — ореол дуги; 6 — основной металл

На рис. 2.3 изображена схема устойчивой сварочной дуги, возникающей при пропускании тока между металлическим (проволочным) электродом 1 и основным металлом 6. Дуговой разряд 3, окруженный пламенем (ореолом) 5, имеет форму расширяющегося столба, у основания которого в толще изделия образуется кратер дуги, или сварочная ванна 4. Под влиянием автоэлектронной эмиссии и теплоты дуги конец электрода и находящийся под ним участок детали расплавляются, на детали возникает сварочная ванна, в которую по каплям 2 стекает расплавленный металл с электрода 1. Устойчивое горение, необходимое для высокого качества сварки, достигается при длине дуги 3...5 мм. Рекомендуемая длина дуги равна диаметру электрода. При слишком длинной дуге металл электрода, плавясь, образует большие шарики (крупнокапельный перенос металла); при этом дуга, часто прерываясь, дает широкий неравномерный и забрызганный сварной шов с недостаточным сплавлением. При слишком короткой дуге выделяется недостаточно теплоты для глубокого проплавления основного металла и происходит частое прилипание электрода к основному металлу.

Устойчивость дуги улучшается с повышением напряжения холостого хода сварочного источника (его измеряют при отключенной нагрузке). Однако этот параметр ограничен требованиями безопасности обслуживающего персонала и не должен превышать 80 В.

Электрическая сварочная дуга может отклоняться от своего нормального положения под действием магнитных полей, неравномерно и несимметрично расположенных вокруг дуги и в свариваемом изделии (рис. 2.4). На эти поля действуют движущиеся заряженные частицы и тем самым оказывают воздействие на всю дугу. Такое явление называется *магнитным гутьем* (рис. 2.5). Воздействие магнитных полей на дугу прямо пропорционально квадрату силы тока и становится заметным при сварочных токах более 300 А.

*Сварочная дуга* — это особый проводник с током, имеющий свое магнитное поле. Сварочный ток, проходя по электроду и свариваемому металлу (рис. 2.4, а), также создает свое магнитное поле. Пока магнитные поля, окружающие дугу, симметричны по отношению к дуге, отсутствует электромагнитная сила воздействия на дугу. Дуга при этом горит по кратчайшему расстоянию к поверхности свариваемого металла (рис. 2.4, в). Несимметричное магнитное поле, окружающее дугу, вызывает отклонение дуги в сторону меньшей плотности магнитного поля, причем чем длин-

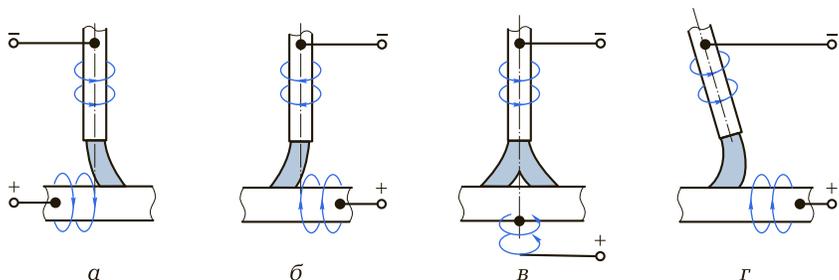


Рис. 2.4. Отклонение дуги постоянного тока под действием магнитного поля:

*а, б* — отклонение дуги под действием магнитных полей, несимметрично расположенных в свариваемой детали; *в* — отсутствие отклонения дуги при симметричном расположении магнитных полей в свариваемой детали; *г* — дуга, отклоненная магнитным полем, горит по кратчайшему расстоянию к поверхности детали

нее дуга, тем сильнее отклонение. Короткая дуга менее подвержена воздействию магнитного дутья.

Асимметрия магнитного поля вызывает магнитное дутье, которое отклоняет дугу вперед (в начале сварного шва) и назад (в конце сварного шва). В некоторых случаях отклонение дуги может происходить под углом как вправо, так и влево. Магнитное дутье наиболее значительно проявляется в начале шва. Изменение полярности или направления сварки при сварке на постоянном токе не оказывает заметного влияния на магнитное дутье.

При сварке на переменном токе магнитное дутье существенно снижается. Уменьшение магнитного дутья происходит в связи с

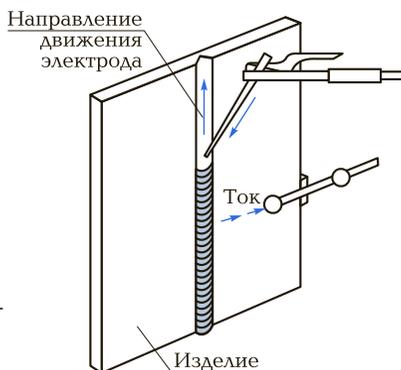


Рис. 2.5. Магнитное дутье, вызываемое несимметрией магнитного поля

тем, что переменный ток создает переменное магнитное поле в основном металле, что, в свою очередь, приводит к появлению вихревых токов.

Магнитное дутье чаще всего возникает при сварке покрытыми электродами и при полуавтоматической и автоматической сварке магнитных материалов (например, сталь, чугун, никель), но может проявляться и при сварке немагнитных материалов. Отклонение дуги от оси вызывает затруднения при сварке, увеличивает разбрызгивание электродного металла и ухудшает качество сварного шва. Для уменьшения магнитного дутья можно:

- изменять направление магнитного потока, проходящего через сварное соединение, установив в начале и конце шва выводные планки, или применить обратноступенчатую сварку, или выполнять прерывистый шов;
- создать внешнее магнитное поле, оборачивая заготовку сварочным кабелем, подводящим ток к электрододержателю;
- при сварке покрытыми электродами произвести позиционирование электрода, уменьшить сварочный ток;
- оборачивать заготовку обратным проводом так, чтобы создаваемое им магнитное поле компенсировало действие магнитного поля, вызывающего отклонение дуги;
- производить сварку на переменном токе, но это может потребовать изменения технологии сварки и замены электродов.

Зависимость напряжения дуги от тока в сварочной цепи при условии постоянной длины дуги называют статической вольт-амперной характеристикой дуги, которая графически представлена на рис. 2.6.

В области 1 (до 100 А) с увеличением тока напряжение значительно уменьшается, так как при повышении силы тока увеличивается поперечное сечение столба дуги и его проводимость.

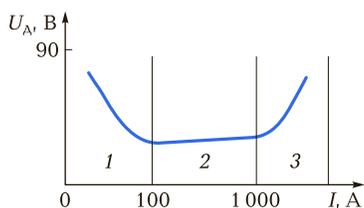


Рис. 2.6. Статическая вольт-амперная характеристика дуги в общем виде

Вольт-амперная характеристика падающая, и дуга горит неустойчиво. В *области 2* (100...1 000 А) при увеличении тока напряжение сохраняет постоянную величину, так как поперечное сечение столба дуги и площади анодного и катодного пятен увеличиваются пропорционально току. Вольт-амперная характеристика жесткая, дуга горит устойчиво, и обеспечивается нормальный процесс сварки. В *области 3* (свыше 1 000 А) увеличение тока вызывает возрастание напряжения, так как увеличение плотности тока выше определенного значения не сопровождается увеличением катодного пятна из-за ограниченного поперечного сечения электрода; при этом вольт-амперная характеристика возрастающая. Дуга с возрастающей вольт-амперной характеристикой используется при сварке под флюсом и сварке в защитных газах.

## 2.2. ТИПЫ СВАРОЧНЫХ ДУГ

Для классификации сварочных дуг используют ряд общих признаков:

- применяемые электроды — сварочная дуга с плавящимся и неплавящимся электродом;
- степень сжатия дуги — свободная и сжатая сварочная дуга;
- схема подвода сварочного тока — сварочная дуга прямого или косвенного действия;
- род тока — сварочная дуга постоянного или переменного тока (в последнем случае — однофазная или трехфазная);
- полярность постоянного тока — сварочная дуга с током прямой или обратной полярности.

В зависимости от схемы подвода тока, рода тока, числа электродов и других признаков различают сварочные дуги прямого действия, косвенного действия, многоэлектродные и сжатые.

*Дугой прямого действия* (рис. 2.7, а) называют дуговой разряд между электродом и заготовкой. Дуговой разряд используют при дуговой сварке покрытыми электродами, при сварке неплавящимся электродом в защитных газах, при сварке плавящимся электродом в защитных газах.

В случае применения неплавящегося электрода соединение выполняют расплавлением основного и присадочного металлов. При использовании плавящегося электрода сварочная ванна заполняется металлом электрода.

Дуга косвенного действия (рис. 2.7, б) представляет собой дуговой разряд между двумя неплавящимися или плавящимися электродами, при этом свариваемый металл не включен в электрическую цепь. Дуга косвенного действия используется при специальных видах сварки и атомно-водородной сварке.

Сжатая дуга (рис. 2.7, в) — это дуга прямого или косвенного действия с неплавящимся вольфрамовым электродом, сжатая кольцевой струей газа. Сжатую дугу получают в специальных горелках — плазмотронах — и применяют для резки и сварки металлов, в том числе тугоплавких.

Сварка плавящимся электродом с использованием дуги прямого действия на постоянном или переменном токе (рис. 2.8, а)

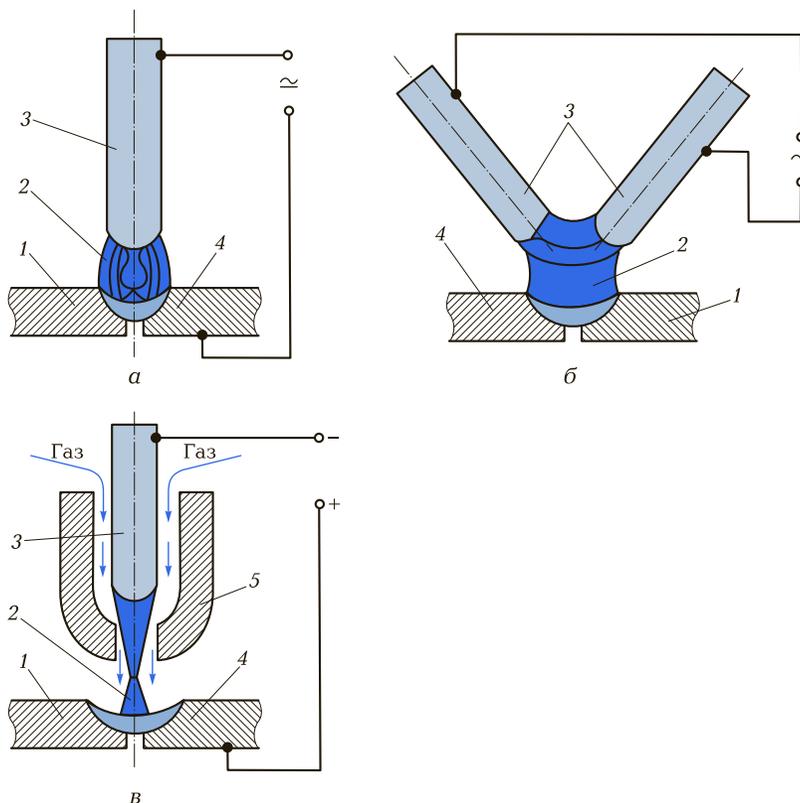


Рис. 2.7. Типы сварочных дуг:

а — дуга прямого действия; б — дуга косвенного действия; в — сжатая дуга; 1, 4 — свариваемые детали; 2 — дуга; 3 — электрод; 5 — сопло

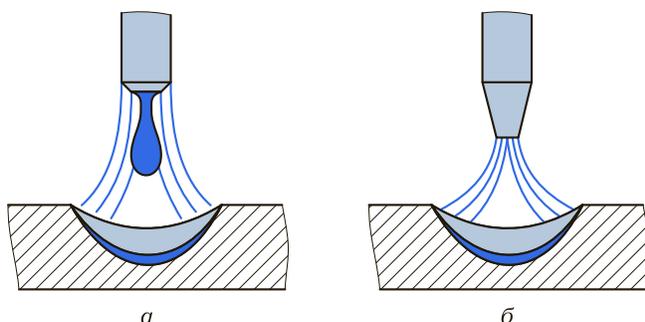


Рис. 2.8. Вид сварочной дуги по применяемым электродам:  
*а* — при плавящемся электроде; *б* — при неплавящемся электроде

получила наибольшее распространение при ремонтных работах. В качестве плавящегося электрода применяют металлический стержень необходимого химического состава, подаваемый в зону дуги по мере его расплавления. Шов образуется из частично расплавленного основного металла и металла электрода.

Сварку неплавящимся электродом с использованием дуги прямого (рис. 2.8, *б*) и (реже) косвенного действия применяют при сварке тонколистового металла, а также при ремонте и изготовлении кузовов автомобилей. Сварной шов образуется за счет расплавления основного металла или основного и присадочного металла, вводимого в зону дуги. Для избежания перегрева электрода сварку неплавящимся электродом ведут, как правило, постоянным током прямой полярности, т. е. электрод подключают к катоду.

### 2.3. ДУГА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

При сварке в защитных газах в качестве источника энергии, обеспечивающего плавление присадочного и основного металлов, используют электрическую дугу. Дуга в отличие от других видов разрядов в газах характеризуется низким катодным падением потенциала, а следовательно, низким общим напряжением дуги и высокой плотностью тока. Электрическая дуга по длине подразделяется на три области, отличающиеся физическими явлениями, протекающими в них.

Участки, непосредственно примыкающие к электродам, называют катодной (у отрицательного электрода) и анодной (у положительного электрода) областями, а участок между ними — столбом дуги. Те части электродов, на которые опирается дуга и через которые проходит основной ток дуги, называют активными пятнами: на положительном электроде — анодным пятном, на отрицательном электроде — катодным пятном.

Размеры катодного пятна обычно меньше, чем анодного. Распределение потенциала по длине электрической дуги неравномерное. Общее падение напряжения на дуге

$$U_{\text{д}} = U_{\text{к}} + U_{\text{а}} + U_{\text{с}}, \quad (2.2)$$

где  $U_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{а}}$  — соответственно катодное и анодное падение напряжения;  $U_{\text{с}}$  — падение напряжения в столбе дуги.

Столб дуги, или дуговая плазма, — это совокупность электронов, ионов, возбужденных и невозбужденных нейтральных атомов и молекул.

Изменение силы тока в столбе электрической дуги может происходить в результате изменения концентрации электронов, их направленной скорости, следовательно, длины свободного пробега, тепловой скорости и напряженности электрического поля в столбе дуги, а также сечения столба дуги. Концентрация электронов характеризуется степенью ионизации.

Поперечные размеры столба дуги, горящей в открытом объеме, определяются силой тока дуги, теплопроводностью газа, заполняющего дуговой промежуток, и давлением.

В молекулярных газах наблюдается иная картина. В центральной части столба основная часть молекул разделена на атомы, а снаружи газ находится в молекулярном состоянии. Молекулы, попадая в зону высоких температур, распадаются, поглощая соответствующую энергию. Следовательно, энергия по радиусу столба дуги передается не только за счет теплопроводности, но и за счет передачи энергии диссоциации.

Температура дуг при сварке плавящимся электродом сравнительно невелика — 5 000...6 500 °С. В дугах с неплавящимися электродами температуры значительно выше. Низкие температуры дуг с плавящимся электродом определяются более низким эффективным потенциалом дугового газа из-за наличия большого количества паров металла в дуге, а также охлаждением столба электродным металлом, переходящим в ванну.

С увеличением давления повышается напряженность поля в столбе, а размеры дуги уменьшаются.

Таким образом, изменяя давление, при котором горит дуга, можно значительно изменять электрические и энергетические характеристики дуг.

Сварочная дуга в защитных газах характеризуется сильным излучением. Основным источником излучения является столб дуги. Наиболее вредными для глаз и кожи человека являются ультрафиолетовое и инфракрасное излучения.

При сварке плавящимся электродом поверхность в катодном пятне нагрета до температуры кипения и с его поверхности всегда происходит интенсивное испарение. Появление паров металла катода приводит к понижению катодного падения потенциала. Размеры катодного пятна и его подвижность зависят от материала и состояния поверхности катода, наличия на ней других элементов, а также силы тока дуги.

В большинстве случаев при сварке плавящимся электродом катодное пятно беспорядочно перемещается (блуждает) по поверхности катода.

Сечение анодного пятна зависит также от силы тока дуги и интенсивности теплоотвода от анода. Размеры анодного пятна обычно больше размеров катодного пятна. Анодное пятно также имеет тенденцию перемещаться по поверхности электрода, однако оно менее подвижно, чем катодное.

## 2.4. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ

**Основные показатели сварочной дуги.** Полная тепловая мощность  $Q$ , Дж/с, определяется выражением

$$Q = K_M I_{св} U_A \quad (2.3)$$

где  $K_M$  — коэффициент мощности (для постоянного тока  $K_M = 1$ ; для переменного тока  $K_M = 0,80 \dots 0,95$ );  $I_{св}$  — сила тока в сварочной цепи, А;  $U_A$  — напряжение дуги.

Выделяющаяся тепловая энергия расходуется на нагрев и плавление электродного и основного металлов, а также электродного покрытия или флюса, а часть энергии рассеивается в окружающей среде.

*Эффективной тепловой мощностью  $g$ , Дж/с, дуги называется количество теплоты, сообщенное свариваемой детали дугой и расходуемое на нагрев и плавление электродного и присадочного металлов в единицу времени:*

$$g = K_M I_{CB} U_A \eta, \quad (2.4)$$

где  $\eta$  — эффективный КПД процесса нагрева металла дугой, который в зависимости от вида сварки имеет следующие значения: при сварке электродами с тонким покрытием — 0,50...0,65; при сварке электродами с толстым покрытием — 0,70...0,85; при сварке неплавящимся электродом в защитных газах — 0,5...0,6.

*Погонной энергией  $g_{II}$ , Дж/с, сварки называется количество теплоты, сообщенное дугой детали на единицу длины шва:*

$$g_{II} = g/v_{CB} = (K_M I_{CB} U_A \eta)/v_{CB}, \quad (2.5)$$

где  $v_{CB}$  — скорость сварки.

Количество расплавленного металла  $G_p$ , г, в единицу времени электродного металла определяется по формуле

$$G_p = a_p I_{CB} t_{CB}, \quad (2.6)$$

где  $a_p$  — коэффициент расплавления, г/(А·ч);  $t_{CB}$  — время горения дуги, ч.

Коэффициентом расплавления называется величина, соответствующая массе, г, электродного металла, расплавленного сварочным током силой 1 А за 1 ч горения дуги.

При плавлении часть электродного металла теряется на разбрызгивание, испарение и окисление; при этом потери электродного металла при ручной сварке тонкопокрытыми электродами составляют 10...20 %, электродами с толстым покрытием — 5...10 % и при сварке в защитных газах — 3...6 %; соответственно и масса наплавленного металла  $G_H$ , г, будет меньше, чем расплавленного:

$$G_H = a_H I_{CB} t_{CB}, \quad (2.7)$$

где  $a_H$  — коэффициент наплавки, г/(А·ч).

Коэффициент наплавки зависит от присадочного материала, материала электрода и его покрытия, рода и полярности тока, а также от потерь при сварке.

Для ручной сварки он колеблется от 6 до 18 г/(А·ч) и составляет в среднем 8...12 г/(А·ч).

Коэффициент потерь  $\psi$ , %, соответствующий количеству металла, теряемого на угар, испарение и разбрызгивание, зависит от состава проволоки, типа покрытия, режима сварки и т.д. При увеличении плотности сварочного тока он возрастает. Числовое значение коэффициента потерь

$$\psi = [(a_p - a_H)/a_p]100. \quad (2.8)$$

В зависимости от вида сварки коэффициент потерь  $\psi$  имеет следующие значения: для сварки электродами с тонким покрытием — 10...20 %; для сварки электродами с толстым покрытием — 5...10 %.

**Основные параметры дуговой сварки.** К основным параметрам дуговой сварки относятся: ток дуги (сила сварочного тока)  $I_{св}$ , напряжение дуги  $U_{д}$  и скорость сварки  $v_{св}$ .

*Ток дуги* — параметр, в наибольшей степени определяющий тепловую мощность. При постоянном диаметре электрода с увеличением силы тока дуги возрастает концентрация тепловой энергии в пятне нагрева, повышается температура плазмы столба дуги и стабилизируется положение активных пятен на электроде и на детали. С увеличением силы сварочного тока увеличивается длина и ширина сварочной ванны; особенно интенсивно увеличивается глубина проплавления. Это обусловлено не только увеличением тепловой мощности и сосредоточением энергии в пятне нагрева, но и значительным повышением давления дуги на сварочную ванну, которое пропорционально квадрату силы сварочного тока. В определенных пределах изменения тока глубина проплавления  $h$  может быть приблизительно оценена зависимостью, близкой к линейной:

$$h = kI_{св}I_{д}, \quad (2.9)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от рода тока, полярности, диаметра электрода и степени сжатия дуги и т.п.;  $I_{д}$  — длина дуги.

При сварке стыковых соединений без разделки кромок и без зазора расплавленный металл электрода образует выпуклость сварного шва. По мере увеличения толщины свариваемых элементов для полного их проплавления необходимо увеличение силы сварочного тока; одновременно с этим увеличивается и количество расплавленного электродного металла. В результате образуются швы с чрезмерно большой выпуклостью. Для получения швов с нормальной выпуклостью следует снижать скорость плавления электрода или прибегать к разделке кромок.

При сварке неплавящимся электродом отсутствует перенос расплавленного металла через дуговой промежуток. Это в значительной мере облегчает условия горения дуги и обуславливает более высокую ее стабильность. Присадочный металл по мере необходимости подается в головную часть сварочной ванны. В отличие от сварки плавящимся электродом скорость плавления присадочного металла не связана жесткой зависимостью с величиной сварочного тока. Количество присадочного металла, подаваемого

в ванну, выбирают из условия обеспечения требуемой доли участия присадочного металла в образовании шва. При сварке стыковых соединений без разделки кромок присадочный металл необходим в основном для образования сварочного валика.

Переход присадочного металла в сварочную ванну, минуя дуговой промежуток, исключает его разбрызгивание. Сокращаются потери на испарение, и ограничивается взаимодействие расплавленного металла с газовой фазой столба дуги.

При сварке неплавящимся электродом создаются благоприятные условия для защиты ванны и формирования шва. Стойкость вольфрамового электрода, в первую очередь, определяется плотностью тока. Большое влияние оказывают род тока и его полярность.

С увеличением *напряжения дуги* возрастает тепловая мощность дуги, а следовательно, и размеры сварочной ванны. Ширина ванны  $e$  связана с напряжением прямой зависимостью:

$$e = kI_{\text{св}}I_{\text{д}}/Sv_{\text{св}}, \quad (2.10)$$

где  $S$  — толщина свариваемого металла;  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки.

При постоянной величине сварочного тока повышение напряжения дуги незначительно сказывается на глубине проплавления ванны.

*Скоростью сварки* называется отношение длины  $l$  шва ко времени  $t_{\text{св}}$  горения дуги:

$$v_{\text{св}} = l/t_{\text{св}} = (a_{\text{н}}I_{\text{св}})/(S\gamma), \quad (2.11)$$

где  $l$  — длина шва;  $t_{\text{св}}$  — время горения дуги;  $S$  — площадь сечения шва;  $\gamma$  — плотность наплавленного металла, г/см<sup>3</sup>.

При постоянном значении погонной энергии увеличение скорости сварки вызывает повышение термического КПД процесса, а это, в свою очередь, приводит к увеличению глубины проплавления и снижению ширины шва.

**Дополнительные параметры дуговой сварки.** Дополнительные параметры связаны с условиями ведения процесса сварки и особенностями горения дуги. Так, например, при одной и той же погонной энергии можно изменять диаметр электрода, род тока и полярность, использовать импульсный и непрерывный режимы горения дуги. В некоторых случаях применяют сжатую дугу, а иногда колебания электрода. Эти особенности процесса также сказываются на формировании сварочной ванны и конечных размерах сварного шва.

*Диаметр электрода.* При постоянной величине сварочного тока диаметр электрода определяет плотность энергии в пятне на-

грева и подвижность дуги. В связи с этим при увеличении диаметра электрода глубина проплавления сварочной ванны уменьшается, а ее ширина увеличивается.

*Род тока и полярность.* В зависимости от рода тока и полярности на изделии выделяется различное количество теплоты. Если теплоту, выделяющуюся на аноде  $W_a$  и катоде  $W_k$ , приближенно оценивать по эффективному падению напряжений, то получим следующие зависимости:

$$\begin{aligned} W_a &= U'_a = U_a + (\varphi + 2kT); \\ W_k &= U'_k = U_k - (\varphi + 2kT), \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $U_a$ ,  $U_k$  — соответственно анодное и катодное падение напряжений;  $\varphi$ ,  $kT$  — соответственно потенциальная и термическая энергия электронов.

При сварке на переменном токе количество теплоты, выделяющейся на электроде и свариваемом изделии, одинаково, т. е.  $W_a = W_k$ .

На катоде не вся энергия  $U_k$  переходит в теплоту, часть ее  $(\varphi + 2kT)$  переносится в плазму столба дуги. На аноде выделяется энергия  $U_a$  и прибавляется потенциальная и термическая энергия электронов. Количество теплоты, выделенное на катоде, зависит от потенциала ионизации дугового промежутка. Разница в тепловыделении на катоде и аноде определяется способом дуговой сварки. В реальных условиях при сварке на прямой полярности (анод на детали) глубина проплавления оказывается меньшей, чем при сварке на обратной полярности (катод на изделии).

*Угол наклона электрода.* При ручной сварке покрытыми электродами, изменяя наклон электрода в плоскости продольной оси шва, можно существенно влиять на размеры сварочной ванны и шва. При  $\alpha < 90^\circ$  сварку выполняют углом вперед. Давление дуги вытесняет расплавленный металл в головную часть ванны. При этом глубина проплавления основного металла уменьшается. При  $\alpha > 90^\circ$  сварку выполняют углом назад. Давление дуги способствует интенсивному вытеснению расплавленного металла из головной части ванны в хвостовую. Глубина проплавления увеличивается.

*Колебание электрода.* При поперечных колебаниях электрода увеличивается ширина шва и уменьшается глубина проплавления. Изменяются условия кристаллизации и тепловой цикл в зоне термического влияния. Колебания электрода в процессе сварки обычно осуществляют с частотой 10...60 колебаний в минуту с амплитудой 2...4 мм.

*Сжатие столба дуги.* При сварке сжатой дугой появляется новый дополнительный параметр режима сварки — степень сжа-

тия дуги. С увеличением степени сжатия дуги возрастает температура плазмы дуги, повышается концентрация теплоты в пятне нагрева, увеличивается глубина проплавления и уменьшается ширина сварочной ванны и шва.

*Импульсная подача тока.* При импульсном горении дуги появляются два новых дополнительных параметра процесса: время импульса  $t_{и}$  и время паузы  $t_{п}$ . Тепловая энергия подводится только во время импульса. Оба этих параметра оказывают влияние на размеры сварочной ванны и шва. При неизменной погонной энергии в течение цикла  $t_{ц} = t_{и} + t_{п}$  увеличение времени паузы ужесточает режим. Значительно возрастает термический КПД процесса. Благодаря этому до определенных значений времени импульса увеличивается глубина проплавления основного металла и уменьшается ширина шва.

## 2.5. ПЛАВЛЕНИЕ И ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МАТЕРИАЛА

При дуговой сварке нагрев и расплавление электрода осуществляются за счет энергии, выделяемой дугой в активном пятне, расположенном на его торце. Вылет электрода нагревается за счет теплоты, выделяемой при прохождении по нему тока. *Вылет* — это участок электрода от места контакта с токоподводящим устройством до его конца. Например, при сварке вручную вылет электрода в начале сварки составляет 200...400 мм, в конце — 30...40 мм. Количество теплоты, выделяемой в электроде в единицу времени, тем больше, чем больше плотность тока, удельное сопротивление и вылет электрода. Качество шва будет обеспечено только тогда, когда температура электрода в момент расплавления его торца не будет превышать определенной температуры, например 600...700 °С при сварке стальными электродами. Нагрев электрода до более высоких температур приводит к отслаиванию покрытия, ухудшению формирования шва и увеличению потерь на разбрызгивание.

Основная характеристика плавления электрода — линейная скорость его расплавления в единицу времени, которая зависит от состава электрода, вида покрытия, режима сварки, плотности и полярности тока. В общем случае скорость плавления электрода возрастает с увеличением силы тока примерно по линейной зависимости.

При плавлении на торце электрода образуется капля жидкого металла. Характер переноса электродного металла зависит от соотношения сил, действующих на каплю металла на торце электрода. К основным силам относят силу тяжести, силу поверхностного натяжения, электромагнитную силу, силу реактивного давления паров, аэродинамическую силу и др. Значения отдельных сил и направление их равнодействующих зависят от режима сварки, полярности тока, состава электродного металла, газовой среды, состояния поверхности и диаметра электрода.

Сила тяжести оказывает существенное влияние лишь при сварке на малых токах (стремление капли под действием собственной силы тяжести переместиться вниз). Сила поверхностного натяжения проявляется в стремлении жидкости под действием молекулярных сил приобрести сферическую форму, имеющую минимальную площадь поверхности при данном объеме. В общем случае увеличение поверхностного натяжения способствует увеличению размеров капель, образующихся на торце электрода и переносимых через дуговой промежуток.

Электромагнитная сила обусловлена взаимодействием проводника с током и магнитного поля, создаваемого этим током. Эта сила стремится деформировать проводник в радиальном направлении и разрушить перемычку между каплей и электродом. Ее значение пропорционально квадрату силы тока.

Испарение металла с поверхности капли и химическое взаимодействие жидкого металла со шлаком или газовой фазой, сопровождаемое образованием и выделением газа, приводят к возникновению реактивных сил. Металл испаряется в области активных пятен, перемещение которых вызывает изменение положения места приложения реактивных сил и значительную подвижность капель. Величина реактивных сил зависит от размеров активных пятен, плотности тока в них и теплофизических свойств материала электрода. В металлах с высоким давлением паров (магний, цинк) отталкивание капель реактивными силами наблюдается при сварке на обеих полярностях, а в металлах с низким давлением паров — главным образом при сварке на прямой полярности.

Сила аэродинамического торможения пропорциональна плотности газа, его скорости и эффективной площади сечения капли, спроектированной на направление газового потока.

При сварке покрытыми электродами наблюдается в основном крупнокапельный и мелкокапельный перенос (рис. 2.9, а). Тип переноса зависит от состава, толщины и вида покрытия, режима сварки, рода тока и полярности.

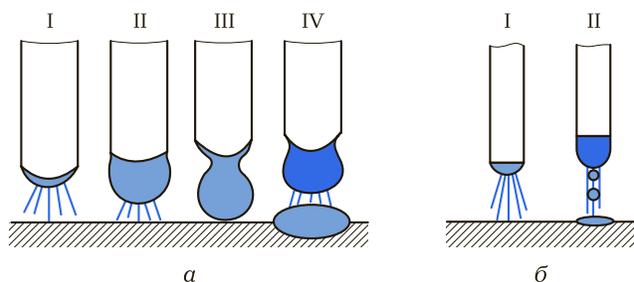


Рис. 2.9. Схемы процессов переноса электродного металла в сварочную ванну:  
 а — капельный; б — струйный; I—IV — этапы процесса переноса капли

При малом напряжении (короткая дуга) перенос металла может осуществляться путем коротких замыканий, поскольку свободный рост капель затруднен. В момент коротких замыканий металл перетекает с торца электрода в ванну. С удлинением дуги масса переносимых капель увеличивается, так как создаются условия для свободного роста капли на торце электрода.

При струйном переносе (рис. 2.9, б) образуются мелкие капли, которые следуют одна за другой в виде непрерывной цепочки (струи). Струйный перенос электродного металла возникает при сварке с большой плотностью тока электродом малого диаметра. Обычно струйный перенос электродного металла приводит к меньшему выгоранию легирующих элементов в сварочной проволоке и повышению чистоты металла капель и сварного шва. Скорость расплавления сварочной проволоки увеличивается, поэтому струйный перенос имеет преимущества перед капельным переносом.

## 2.6. ПЛАВЛЕНИЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

Процесс распространения теплоты в металле зависит от ряда факторов: эффективной тепловой мощности дуги, характера ее перемещения, размера и формы свариваемого изделия, теплофизических свойств материала. Влияние этих факторов на нагрев изделия можно оценить по изменению формы изотерм температурного поля (рис. 2.10). С увеличением тока (мощности) дуги области металла, нагретые до определенных температур, расши-

ряются, а увеличение скорости перемещения дуги приводит к сужению этих областей в направлении, перпендикулярном оси шва, и сгущению изотерм перед дугой. Форма сварочной ванны при дуговых процессах характеризуется длиной, шириной и глубиной проплавления основного металла (рис. 2.11). Объем сварочной ванны в зависимости от способа и режима сварки изменяется от 0,1 до 10 см<sup>3</sup>. Время нахождения металла в жидком состоянии в различных ее участках неодинаково. Приблизительно сред-

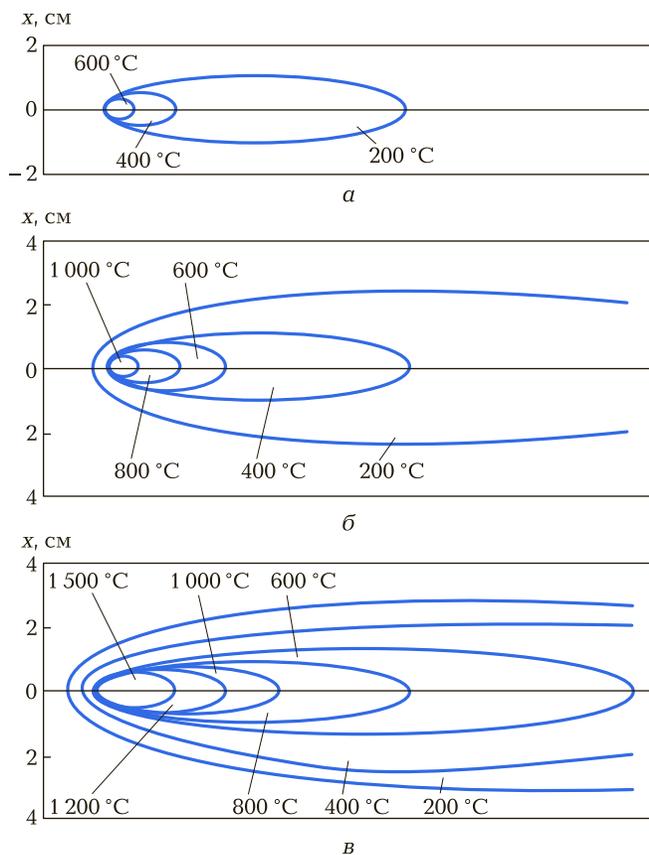


Рис. 2.10. Влияние силы тока на положение изотерм — линий, определяющих температурные поля с постоянной температурой нагрева на поверхности деталей при дуговой сварке:

а, б, в — соответственно при силе тока дуги 200; 300 и 400 А;  
 х — ширина температурного поля

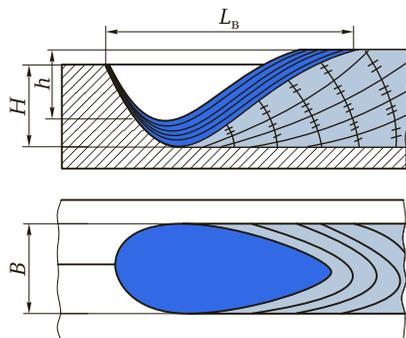


Рис. 2.11. Параметры формы сварочной ванны:

$L_B$  — длина ванны;  $B$  — ширина шва;  $h$  — разность уровней расплавленного металла в ванне под действием давления дуги;  $H$  — глубина проплавления основного металла

нюю продолжительность существования сварочной ванны  $t_{cp}$ , с, можно рассчитать с помощью соотношения

$$t_{cp} = L_B / v_{cp}, \quad (2.13)$$

где  $L_B$  — длина ванны, мм;  $v_{cp}$  — скорость перемещения источника нагрева, мм/с.

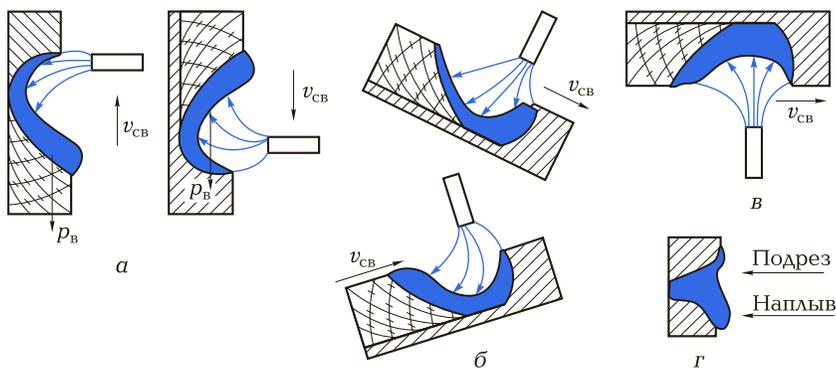


Рис. 2.12. Формы сварочной ванны в зависимости от условий формирования шва при его положении в пространстве:

$a$  — в вертикальном положении (слева — на подъем; справа — на спуск);  $b$  — в наклонном положении;  $v$  — в потолочном положении;  $г$  — в горизонтальном положении;  $v_{св}$  — скорость сварки;  $p_B$  — гидростатическое давление (вертикально вниз)

В головной части ванны под воздействием источника теплоты металл нагрет значительно выше температуры его плавления, а в хвостовой части ванны температура приближается к температуре плавления основного металла.

Важным фактором, влияющим на геометрические параметры ванны, является пространственное положение выполняемых швов (рис. 2.12). При сварке в вертикальном положении (рис. 2.12, а) снизу вверх (на подъем) глубина проплавления резко возрастает, при сварке на спуск — уменьшается. При сварке в потолочном положении (рис. 2.12, в) необходимо ограничение объема ванны. Наиболее неблагоприятные условия формирования ванны создаются при выполнении горизонтальных швов (рис. 2.12, г).

## 2.7. СТРУКТУРА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, состоят из трех зон (рис. 2.13): литого металла сварного шва в той части соединения, где существовала расплавленная ванна жидкого металла; основного металла, подвергшегося тепловому влиянию сварки, называемого зоной термического влияния, или околшовоной зоной; основного металла, не испытывавшего такого влияния. Условную поверхность раздела между металлом сварного шва и околшовоной зоной называют *границей сплавления*.

Структура основного металла определяется технологической обработкой заготовок перед сваркой. Детали могут быть изготов-

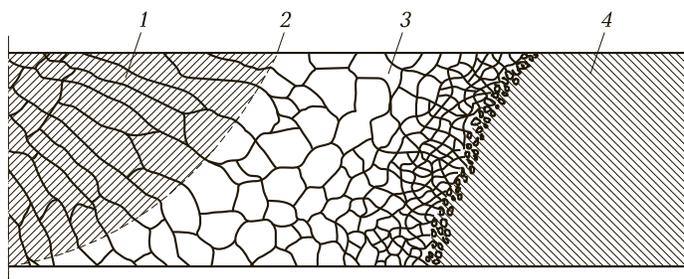


Рис. 2.13. Основные структурные зоны в поперечном сечении сварного соединения:

1 — металл сварного шва; 2 — граница сплавления; 3 — металл в зоне термического влияния; 4 — основной металл

лены в виде листа из деформированного металла в состоянии нагартовки, отпуска или рекристаллизации; из отливок или поковок с литой и деформированной структурой.

Теплота, выделяемая при сварке, распространяется в основной металл. Чем ближе эта точка расположена к границе сплавления, тем быстрее в ней происходит нагрев металла и тем выше максимальная температура нагрева, поэтому структура и свойства основного металла в различных участках зоны термического влияния различны. Основной металл (нагартованный или после отжига на снятие напряжений) претерпевает в этой зоне возврат и рекристаллизацию. Степень развития этих превращений в каждом слое зоны зависит от максимальной температуры нагрева слоя, длительности нахождения выше температуры фазового превращения, скорости нагрева и охлаждения.

Жидкий металл сварочной ванны затвердевает в особой форме, какой являются оплавленные кромки основного металла. Кромки основного металла одновременно служат подложкой для затвердевающего металла. Переход жидкого металла в твердое состояние с кристаллическим строением называют *кристаллизацией*. Образующиеся при затвердевании кристаллы металла принято называть *кристаллитами*.

В центре сварных швов часто появляется зона равноосных кристаллитов в результате переохлаждения центральной части сварочной ванны. Кристаллиты этой зоны вследствие независимого зарождения ориентированы хаотично. В общем случае металл сварного шва состоит из сильно разориентированных кристаллитов. Чем больше кривизна поверхности сварочной ванны и меньше ее размеры, тем более разориентированы соседние кристаллиты в шве.

Чем больше скорость охлаждения, тем более вероятны зарождение и рост свободных кристаллитов с хаотической ориентацией и соответственно уже зона и меньше размер столбчатых кристаллитов.

Металл зоны термического влияния химически более однороден, чем литой металл шва. Основным видом химической неоднородности в металле околошовной зоны — накопление примесей или легирующих добавок по границам зерен.

Низкоуглеродистые стали (содержание углерода — до 0,25 мас.%) обладают полиморфизмом (рис. 2.14). В исходном состоянии сталь представляет собой смесь зерен феррита ( $\alpha$ -железо) с кристаллической решеткой в виде объемно-центрированного куба и перлита (смесь, состоящая из кристаллов  $\alpha$ -железа и цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). При нагреве стали выше  $723^\circ\text{C}$  (обозначение этой температуры

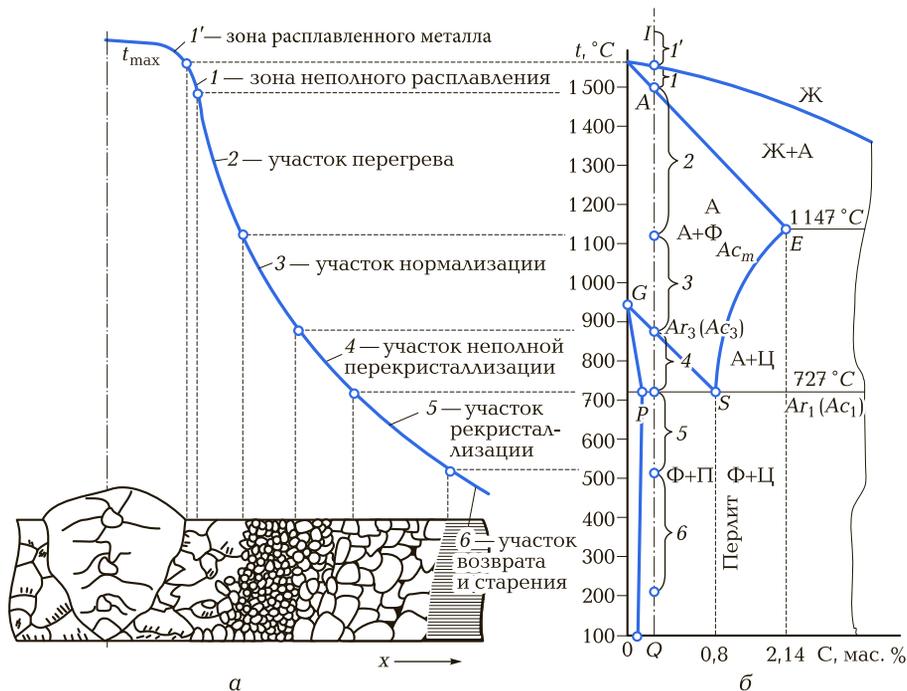


Рис. 2.14. Структура (а) низкоуглеродистой стали в зоне сварного соединения в соответствии с диаграммой (б) состояния железо—углерод:

$t_{\text{max}}$  — кривая максимальных температур нагрева стали в направлении, поперечном ведению сварки;  $x$  — расстояние от оси шва по горизонтали; Ж — расплавленный (жидкий) металл; А — аустенит (твердый раствор); Ц — цементит; Ф — феррит; П — перлит;  $AE, ES, SG, GP, PQ$  — линии растворимости углерода в железе

при нагреве  $A_{r1}$ ; при охлаждении —  $A_{c1}$ ) начинается превращение этой смеси в аустенит (раствор углерода в  $\gamma$ -железе, имеющем решетку в виде гранецентрированного куба). При температурах  $A_{r2}$  ( $A_{c2}$ ) (примерно при  $880^\circ\text{C}$ ) процесс заканчивается, т. е. структура стали становится полностью аустенитной. При нагреве выше  $1100^\circ\text{C}$  аустенитное зерно интенсивно растет, и сталь, нагретая выше этой температуры, имеет структуру перегрева.

При сварке низкоуглеродистой стали в околошовной зоне, нагреваемой от температуры окружающей среды до температуры плавления, формируется (в соответствии с диаграммой состояния железо — углерод) набор структурных зон.

Участок неполного расплавления примыкает непосредственно к сварному шву и является переходным от литого металла шва к основному. Он представляет собой узкую ( $0,1 \dots 0,4$  мм) область основного металла на границе сплавления, нагреваемую до частичного оплавления границ зерен.

*Участок перегрева* — область основного металла, где максимальные температуры при нагреве были выше  $1100^\circ\text{C}$ , а после охлаждения на базе крупнозернистого аустенита образовалась крупнозернистая ферритно-перлитная (или даже мартенситная) структура с пониженными механическими свойствами (низкая пластичность).

Участок нормализации соответствует нагреву в аустенитную область до температур  $900 \dots 1100^\circ\text{C}$  и перекристаллизации при охлаждении ниже  $A_{c1}$  в мелкозернистую ферритно-перлитную структуру. Металл участка нормализации обладает высокими механическими свойствами, так как фазовое превращение проходит на базе мелкозернистого аустенита, не подвергшегося перегреву.

Участок неполной перекристаллизации нагревается в пределах  $723 \dots 900^\circ\text{C}$ . В связи с недостаточной длительностью и температурой нагрева структура металла состоит из смеси мелких перекристаллизовавшихся зерен и крупных зерен феррита и перлита, которые не успели перекристаллизоваться. Свойства металла этого участка более низкие, чем участка нормализации.

Участок рекристаллизации наблюдается при сварке сталей, подвергавшихся пластической деформации (прокатке, ковке, штамповке). При нагреве до  $450 \dots 725^\circ\text{C}$  в этой области основного металла развивается процесс рекристаллизации, приводящий к росту зерна, огрублению структуры и разупрочнению металла.

В участке, нагреваемом до  $100 \dots 450^\circ\text{C}$ , могут протекать процессы возврата и старения в связи с выпадением карбидов и нит-

ридов железа. Результатом старения является снижение пластичности, вязкости и сопротивления хрупкому разрушению.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Назовите три основных состояния вещества. Объясните, в чем их различия.
2. Почему газы в обычных условиях не проводят электрический ток?
3. Что называют сварочной дугой?
4. Чем переносятся электрические заряды в сварочной дуге?
5. Каким образом осуществляется зажигание дуги?
6. Опишите строение свободной дуги.
7. По каким признакам классифицируют сварочные дуги?
8. Какие дуги называют короткими, нормальными и длинными?
9. Что выражает статическая вольт-амперная характеристика дуги?
10. Почему вольт-амперная характеристика может быть падающей?
11. В чем различие падающей и жесткой вольт-амперной характеристик?
12. Какова роль ионизации в зажигании и горении дуги?
13. Для чего применяют осцилляторы?
14. Что такое магнитное дутье и как оно проявляется?
15. Каковы меры борьбы с магнитным дутьем?
16. Объясните сущность процесса переноса металла через дугу при сварке.
17. Какие виды переноса металла через дугу вы знаете?
18. При каких видах сварки происходит процесс капельного переноса металла через дугу?
19. По какой формуле можно определить эффективную тепловую мощность?
20. Что вы знаете об эффективном КПД нагрева детали?
21. При каком виде сварки наиболее рационально используется теплота, выделяемая в дуге?
22. Что такое погонная энергия сварки и на что она влияет?
23. Расскажите о формировании и структуре шва в момент перехода металла из жидкого состояния в твердое.
24. Что такое зона термического влияния? Назовите и ее основные участки.
25. Дайте краткую характеристику зоны термического влияния при сварке низкоуглеродистых сталей.

# РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

## 3.1. СХЕМА ПРОЦЕССА РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Схема ручной дуговой сварки металлическим покрытым электродом показана на рис. 3.1. Возбуждение дуги происходит при кратковременном замыкании электрической сварочной цепи касанием свариваемого металла концом электрода. В процессе сварки по мере плавления электрода его подводят к изделию, одновременно перемещая вдоль соединения и поперек стыка для получения необходимой формы и сечения шва.

При сварке покрытым электродом происходит плавление стержня и покрытия. Из расплавляющегося покрытия образуется шлак и газы. Шлаковый слой предохраняет металл от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. Газы оттесняют воздух из

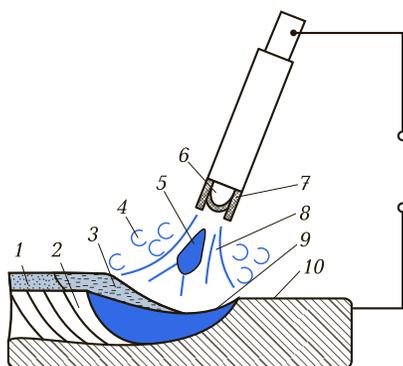


Рис. 3.1. Схема ручной дуговой сварки покрытыми электродами:  
 1 — шлаковая корка; 2 — сварной шов; 3 — жидкая шлаковая пленка; 4 — газовая защита; 5 — капля электродного металла; 6 — электрод; 7 — электродное покрытие; 8 — сварочная дуга; 9 — сварочная ванна; 10 — основной металл свариваемой детали

зоны плавления (зоны дуги) и обеспечивают дополнительную защиту от контакта с ним.

Покрытыми электродами сваривают и наплавляют черные и цветные металлы и различные сплавы. Рациональная область применения дуговой сварки покрытыми электродами — изготовление конструкций из металлов с толщиной соединяемых элементов более 2 мм при небольшой протяженности швов, расположенных в труднодоступных местах и различных пространственных положениях.

Основные достоинства данного способа сварки — универсальность и простота оборудования; недостаток — невысокая производительность, которая обусловлена малыми допустимыми значениями плотности тока и тем, что формирование шва происходит в основном за счет электродного металла.

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

### 3.2. ПОКРЫТЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Электрод для ручной дуговой сварки (рис. 3.2) представляет собой стержень 1 длиной до 450 мм, изготовленный из сварочной проволоки, на поверхность которого нанесен слой покрытия 2. Левый конец электрода на участке длиной 20...30 мм освобожден от покрытия для зажатия его в электрододержателе в целях обеспечения электрического контакта. Торец другого конца очищен от покрытия для возможности возбуждения дуги посредством касания изделия электродом в начале процесса сварки.

Согласно ГОСТ 9466—75 в соответствии с отношением  $D/d$  различают электроды:

- с тонким покрытием ( $D/d < 1,2$ ) — М;
- со средним покрытием ( $1,2 < D/d < 1,45$ ) — С;
- с толстым покрытием ( $1,45 < D/d \leq 1,8$ ) — Д;
- с особо толстым покрытием ( $D/d > 1,8$ ) — Г.

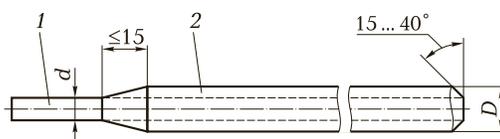


Рис. 3.2. Схема покрытого электрода для ручной дуговой сварки:  
 1 — стержень из электродной проволоки; 2 — покрытие;  
 $d$  — диаметр электродной проволоки;  $D$  — диаметр покрытого электрода

Покрытие электрода представляет собой смесь веществ, нанесенную для усиления ионизации, защиты от неблагоприятного воздействия среды и металлургической обработки металла сварочной ванны. В покрытие электрода вводят ионизирующие, газо- и шлакообразующие, легирующие, раскисляющие, связующие и формовочные компоненты.

*Ионизирующие компоненты* обеспечивают устойчивое горение дуги. Они содержат элементы с низким потенциалом ионизации, такие как калий и кальций, которые входят в состав мела, полевого шпата и гранита, а также натрия и др.

*Газообразующие компоненты* применяют для создания газовой защиты зоны дуги и сварочной ванны. К ним относятся как органические вещества (крахмал, пищевая мука, декстрин и др.), так и неорганические (обычно карбонаты мрамор  $\text{CaCO}_3$ , магнезит  $\text{MgCO}_3$  и др.). Газовая защита образуется в результате диссоциации органических веществ при температуре выше  $200^\circ\text{C}$  и карбонатов при температуре около  $900^\circ\text{C}$ . Процесс диссоциации происходит вблизи от торца электрода. При обычном составе электродных покрытий на каждый грамм металла электродного стержня выделяется  $90 \dots 120 \text{ см}^3$  защитного газа, состоящего из углекислого газа  $\text{CO}_2$ , угарного газа  $\text{CO}$ , водорода  $\text{H}_2$  и кислорода  $\text{O}_2$ . При этом обеспечиваются достаточно надежное оттеснение воздуха из зоны сварки и попадание незначительного количества азота (не более  $0,03\%$ ) в металл шва.

*Шлакообразующие компоненты* вводят для получения жидких шлаков. В качестве шлакообразующих компонентов используют следующие руды и минералы: ильменит, рутил, полевой шпат, кремнезем, гранит, мрамор, плавиковый шпат.

*Легирующие компоненты* предназначены для улучшения механических характеристик металла шва, придания ему жаро- и износостойкости, коррозионной стойкости и других свойств. Леги-

рующими элементами служат хром, марганец, титан, ванадий, молибден, никель, вольфрам и др. Легирующие элементы вводят в покрытие в виде ферросплавов и чистых металлов.

*Раскисляющие компоненты* используют для восстановления (раскисления) части расплавленного металла, находящегося в виде оксидов. К ним относятся элементы, имеющие большее, чем железо (при сварке сталей), сродство к кислороду и другим элементам, оксиды которых требуется удалить из металла шва. Большинство раскислителей вводят в электродное покрытие в виде ферросплавов.

*Связующие компоненты* применяют для связывания порошковых составляющих покрытия в однородную вязкую массу, которая будет крепко удерживаться на стержне электрода при пресовке и образовывать прочное покрытие после сушки и прокалики. Чаще всего связующими компонентами служат водные растворы натриевого ( $\text{Na}_2\text{O SiO}_2$ ) или калиевого ( $\text{K}_2\text{O SiO}_2$ ) жидкого стекла.

*Формовочные компоненты* — это вещества (бентонит, каолин, декстрин, слюда и др.), придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства.

К покрытию электродов предъявляют следующие требования:

- обеспечение стабильного горения дуги;
- получение металла шва с необходимым химическим составом и свойствами;
- спокойное, равномерное плавление электродного стержня и покрытия;
- формирование высококачественного шва и отсутствие в нем пор, шлаковых включений и других дефектов;
- легкая отделимость шлака от поверхности шва после остывания;
- хорошие технологические свойства обмазочной массы, не затрудняющие процесса изготовления электродов;
- удовлетворительные санитарно-гигиенические условия труда при изготовлении электродов и сварке.

Для получения высококачественных сварных швов покрытие электрода должно удерживаться на металлическом стержне и быть сплошным до тех пор, пока не будет использован весь электрод (огарок), чтобы обеспечить необходимую защиту зоны сварки. В связи с этим температура металлического стержня, опреде-

ляемая силой сварочного тока, к концу расплавления электрода не должна превышать 500 °С, а с покрытиями, содержащими органические вещества, — 250 °С.

К физическим свойствам шлаков относятся: температура плавления, температурный интервал затвердевания, теплоемкость, теплопроводность, теплосодержание, вязкость, газопроницаемость, плотность, поверхностное натяжение, тепловое расширение (линейное и объемное). Необходимо, чтобы при плавлении всех видов электродных покрытий шлак всплывал из сварочной ванны, т.е. его плотность должна быть ниже плотности жидкого металла.

Температурный интервал затвердевания шлака должен быть ниже температуры кристаллизации металла сварочной ванны для пропускания выделяющихся из нее газов. Наиболее благоприятная для сварки температура плавления шлаков составляет 1 100... 1 200 °С.

Различают «длинные» и «короткие» шлаки. У «длинных» шлаков переход от жидкого состояния к твердому происходит в течение значительного температурного интервала, и они при прочих равных условиях хуже обеспечивают формирование шва.

У расплавленных «коротких» шлаков возрастание вязкости с понижением температуры происходит быстро, и закристаллизовавшийся шлак препятствует стеканию жидкого металла при сварке в любом пространственном положении. «Короткие» шлаки образуются при использовании электродов с основным покрытием. Чем меньше вязкость шлака, тем больше его подвижность, физическая и химическая активность, тем быстрее протекают в нем химические реакции и физические процессы растворения оксидов, сульфидов и т.п. Кислые шлаки обычно бывают очень вязкими и «длинными», причем вязкость возрастает с повышением кислотности.

Затвердевший шлак будет легче отделяться от поверхности шва, если у него слабое сцепление с металлом и их коэффициенты линейного расширения неодинаковы.

К химическим свойствам шлаков, существенно влияющим на сварочный процесс, относится способность шлака раскислять металл шва, связывать оксиды в легкоплавкие соединения и легировать металл шва.

Виды электродных покрытий установлены ГОСТ 9466—75. Различают электроды с кислым покрытием — А; с основным покрытием — Б; с целлюлозным покрытием — Ц; с рутиловым покрытием — Р; с покрытием прочего вида — П. При наличии по-

крытия смешанного вида используют соответствующее двойное обозначение. Если в покрытии содержится более 20 % железного порошка, то к обозначению вида покрытия добавляют букву Ж.

У электродов с кислым покрытием (А) шлакообразующую основу составляют железные (гематит —  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и марганцевые ( $\text{MnO}_2$ ) руды, а также кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ). Газовая защита расплавленного металла осуществляется органическими компонентами, сгорающими в процессе плавления электрода. В качестве раскислителя в покрытие вводят ферромарганец. Образующиеся кислые шлаки не содержат  $\text{CaO}$  и не очищают металл от серы и фосфора. В наплавленном металле много растворенного кислорода (до 0,12 %), водорода (до  $15 \text{ см}^3$  в 100 г металла) и неметаллических включений. В результате швы обладают невысокой стойкостью к образованию горячих трещин и пониженной ударной вязкостью. Электроды с такими покрытиями непригодны для сварки сталей, легированных кремнием и другими элементами, так как они интенсивно окисляются. При сварке спокойных низкоуглеродистых сталей с высоким содержанием кремния возможно образование пор. При сварке выделяется много токсичной пыли, содержащей оксиды марганца и кремния, и происходит сильное разбрызгивание металла.

Достоинствами этих электродов являются стабильное горение дуги при постоянном и переменном токах, возможность сварки в различных пространственных положениях, большая скорость плавления, высокая проплавливающая способность, отсутствие пор при наличии на свариваемых поверхностях окалины или ржавчины и при случайном удлинении дуги. Покрытиями этого вида обычно снабжают электроды марок МЭЗ-4 и СМ-5. В настоящее время электроды с кислым покрытием выпускают в малом количестве; их применяют для сварки неответственных металлоконструкций.

У электродов с основным покрытием (Б) шлакообразующими компонентами являются карбонаты (мрамор, мел, магнезит) и фториды кальция (например, плавиковый шпат —  $\text{CaF}_2$ ). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается углекислым газом и оксидом углерода, образующимися при диссоциации карбоната кальция в процессе нагрева и плавления покрытия. В качестве раскислителей покрытие может содержать ферромарганец, ферросилиций, ферротитан и ферроалюминий.

Являясь слабоокисленными, покрытия этого вида позволяют легировать расплавленный металл элементами с большим сродством к кислороду. Легирование марганцем и кремнием, осуществляемое при переходе их из ферромарганца и ферросилиция в

сварочную ванну, придает соединению высокую прочность. Помимо этого для легирования в покрытие можно водить металлические порошки. Наличие в нем большого количества соединений кальция, хорошо связывающих серу и фосфор, которые затем выделяются в шлак, обеспечивает высокую чистоту наплавленного металла с малым содержанием серы и фосфора. При высокой температуре плавиковый шпат разлагается с выделением атомарного фтора, который связывает водород в устойчивую, нерастворимую в металле молекулу HF. В результате наплавленный металл содержит незначительное количество водорода ( $4 \dots 10 \text{ см}^3$  в 100 г металла). Применение в покрытии активных раскислителей (титан, алюминий и кремний) обеспечивает низкое (менее 0,05 %) содержание кислорода в металле шва, поэтому наплавленный металл мало склонен к старению, стоек к образованию кристаллизационных трещин и пластичен при низких температурах.

Сварочно-технологические свойства электродов с основным покрытием хуже, чем у электродов с покрытиями других видов. Образование большого количества отрицательных ионов фтора при плавлении покрытия приводит к уменьшению проводимости дугового разряда и снижению устойчивости горения дуги, поэтому сварку электродами с основным покрытием осуществляют на постоянном токе обратной полярности. Для сварки переменным током применяют электроды с дополнительным содержанием ионизирующих элементов в покрытии, например калия (в электродах марок СМ-11 и УП-1/55), или со специальным двухслойным покрытием (например, электроды марки АНО — Д).

Наличие влаги, масла, окалины или ржавчины на свариваемых кромках, присутствие влаги в покрытии, а также увеличение длины дуги приводят к образованию пор в металле шва. Перед сваркой необходимо прокалить электроды при температуре 350... 400 °С в течение 1 ч.

*Электроды с целлюлозным покрытием (Ц)* содержат много (до 50 %) органических составляющих (целлюлоза, травяная мука и т. п.) для образования большого количества газов. В качестве шлакообразующих компонентов чаще всего применяют рутил, карбонаты и алюмосиликаты, иногда добавляют асбест ( $\text{CaO} \cdot 3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2$ ), а для раскисления наплавленного металла — ферромарганец. При сварке на торце электрода образуется конусная втулка из нерасплавившегося покрытия, что способствует образованию направленного потока газов, который оттесняет жидкий металл из-под дуги и обеспечивает более глубокое проплавление основного металла. Такие электроды (марки ВСЦ-4А

и др.) используют для сварки корневого слоя шва неповоротных стыков трубопроводов методом опирания сверху вниз с высокой скоростью, достигающей 25 м/ч. Они позволяют получить хорошую обратную сторону шва, что исключает необходимость в его подварке изнутри. Для наложения заполняющих и облицовочных швов при сварке ответственных конструкций из низколегированных сталей во всех пространственных положениях предназначены, например, электроды марки ВСЦ-60.

У электродов с рутиловым покрытием (Р) шлакообразующую основу составляют рутиловый концентрат, содержащий до 45 % рутила ( $\text{TiO}_2$ ); алюмосиликаты — слюда ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), полевой шпат ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ), каолин ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и др.; карбонаты — мрамор ( $\text{CaCO}_3$ ) и магнезит ( $\text{MgCO}_3$ ). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается введением органических соединений (до 5 %), а также разложением карбонатов. Наплавленный металл раскисляется и легируется ферромарганцем (до 10...15 %). Поскольку у рутилового покрытия окислительная способность меньше, чем у кислого, количество марганца в нем ниже и его гигиенические характеристики гораздо лучше. Содержание оксидов марганца в аэрозоле при сварке в 3—5 раз меньше, чем при наличии кислого покрытия. По качеству наплавленного металла эти электроды занимают промежуточное положение между электродами с кислым и основным покрытиями.

Электроды с рутиловым покрытием обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами: обеспечивают условия для формирования шва с плавным переходом к основному металлу, малое разбрызгивание расплава, легкую отделимость шлака, сварку во всех пространственных положениях, стабильное горение дуги на постоянном и переменном токах. Металл шва мало склонен к образованию пор при колебаниях длины дуги и сварке по окисленной или загрязненной поверхности. Наплавленный металл соответствует по химическому составу полуспокойной или спокойной стали. Покрытие этого вида имеют электроды марок АНО-4, ОЗС-12 и др.

Для повышения коэффициента наплавки в покрытия этого вида часто вводят порошок железа. При его массовой доле в покрытии, не превышающей 35 % (в электродах марок АНО-5, ОЗС-6 и др.), сварку можно выполнять в различных пространственных положениях. Электроды (например, марок АНО-1, ОЗС-3 и др.) с покрытиями, содержащими 50...65 % железного порошка, предназначены для высокопроизводительной сварки швов большой протяженности при толщине изделий 10...20 мм. Разбавляя металл свароч-

ной ванны низкоуглеродистым железным порошком, можно существенно повысить стойкость металла шва к образованию кристаллизационных трещин. Электроды с рутиловым покрытием применяют для сварки металлоконструкций и трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 490 МПа.

К *электродам с покрытиями смешанного вида* относятся электроды с кислородоцеллюлозным (АЦ), рутилово-основным (РБ) (рутилово-карбонатным или карбонатно-рутиловым), кислородоцеллюлозным (АР), рутилово-целлюлозным (РЦ) и другими видами покрытий. К электродам с кислородоцеллюлозным покрытием относятся электроды марки ОМА-2, предназначенные для сварки тонколистовых конструкций (толщиной 1...3 мм) из углеродистых и низколегированных сталей постоянным и переменным током. К электродам с кислородоцеллюлозным (ильменитовым) покрытием относятся электроды марок ОММ-5, АНО-6, АНО-6М, АНО-17 и др. Они содержат в покрытии ильменит ( $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ) и предназначены для сварки конструкций из углеродистых сталей во всех пространственных положениях постоянным и переменным током.

Электроды с рутилово-основным покрытием появились в результате попыток объединить преимущества рутиловых и основных покрытий. Они предназначены для сварки оборудования из углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 490 МПа, когда предъявляются повышенные требования к пластичности и ударной вязкости металла сварных швов. К электродам с рутилово-основным видом покрытия относятся электроды марок МР-3, АНО-30, ОЗС-28 и др.

### 3.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Технологические характеристики плавления электродов определяются экспериментально, позволяют судить о производительности и экономичности процесса сварки электродами той или иной марки.

*Коэффициент расплавления  $a_p$ , г/(А·ч)*, определяют по формуле

$$a_p = G_p / (I_{св} T_0), \quad (3.1)$$

где  $G_p$  — масса, г, металла электрода, расплавленного за время  $T_0$ , ч, горения дуги;  $I_{св}$  — сила сварочного тока, А.

Для электродов, содержащих в покрытии дополнительный металл (например, железный порошок), масса расплавленного металла определяется по формуле

$$G_p = G_э + G_д, \quad (3.2)$$

где  $G_э$  — масса расплавленной части металлического стержня электрода;  $G_д$  — масса расплавленного дополнительного металла, содержащегося в покрытии электрода.

*Коэффициент наплавки*  $a_n$ , г/(А·ч), определяется по формуле

$$a_n = G_n / (I_{св} T_0), \quad (3.3)$$

где  $G_n$  — масса, г, металла, полученного за счет металлического стержня электрода и дополнительного металла (если он содержался в покрытии электрода) и наплавленного за время  $T_0$ , ч, при силе сварочного тока  $I_{св}$ , А.

*Коэффициент потерь*  $\Psi$ , %, рассчитываемый по формуле

$$\Psi = [(G_p - G_n) / G_p] 100, \quad (3.4)$$

характеризует потери металла электрода на испарение, разбрызгивание и окисление.

*Коэффициент массы покрытия*  $K_n$ , %, определяется по формуле

$$K_n = (G_n / G_m) / 100, \quad (3.5)$$

где  $G_n$  — масса покрытия на электроде;  $G_m$  — масса металла части стержня, имеющей покрытие.

Рассмотренные характеристики электродов используются для нормирования сварочных работ и расхода электродов. Например, если известны площадь наплавленного металла шва  $F_n$  и длина шва  $l_{ш}$ , то масса этого металла

$$G_n = F_n l_{ш} \rho, \quad (3.6)$$

где  $\rho$  — плотность металла (для большинства сталей  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>).

По паспорту выбранной марки электрода в соответствии с его диаметром и пространственным положением сварки определяют  $I_{св}$  и коэффициенты  $a_p$ ,  $a_n$ ,  $\Psi$ ,  $K_n$ .

Основное время сварки определяют по формуле

$$T_0 = G_n / (a_n I_{св}). \quad (3.7)$$

*Массу электродов*, необходимую для сварки данного шва, можно определить по формуле

$$G_э = K_p G_n, \quad (3.8)$$

где  $K_p$  — коэффициент расхода электродов на 1 кг наплавленно-го металла шва (значение этого коэффициента приводится в паспорте конкретной марки электродов; обычно  $K_p = 1,4 \dots 1,9$ ).

### 3.4. КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

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

Согласно ГОСТ 9466—75 выпускается 116 типов электродов. Электроды для сварки и наплавки сталей в соответствии с назначением подразделяются на следующие классы:

- электроды для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, имеющих временное сопротивление разрыву (или предел прочности)  $\sigma_b < 600$  МПа (60 кгс/мм<sup>2</sup>), — У; для сварки легированных конструкционных сталей с  $\sigma_b > 600$  МПа — Л;
- электроды для сварки теплоустойчивых сталей — Т;
- электроды для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — В;
- электроды для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Н.

Данный стандарт регламентирует размеры электродов, толщину и типы покрытий, условные обозначения, общие технические требования, правила приемки и методы испытания.

По допустимым пространственным положениям сварки или наплавки электроды подразделяются на четыре вида:

- электроды для всех положений — индекс 1;
- электроды для всех положений, кроме вертикального сверху вниз, — индекс 2;
- электроды для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх — индекс 3;
- электроды для нижнего и нижнего «в лодочку» — индекс 4.

По роду и полярности применяемого при сварке или наплавке тока, а также по номинальному напряжению холостого хода источника питания переменного тока частотой 50 Гц электроды подразделяются на виды, указанные в табл. 3.1.

**Таблица 3.1. Обозначение видов электродов в зависимости от рода и полярности сварочного тока**

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Номинальное напряжение источника переменного тока, В	Пределы отклонений	Обозначение
Обратная	50	$\pm 5$	0
Любая	50	$\pm 5$	1
Прямая	50	$\pm 5$	2
Обратная	50	$\pm 5$	3
Любая	70	$\pm 10$	4
Прямая	70	$\pm 10$	5
Обратная	70	$\pm 10$	6
Любая	90	$\pm 5$	7
Прямая	90	$\pm 5$	8
Обратная	90	$\pm 5$	9

**Обозначение электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей.** Условное обозначение электродов должно содержать данные в определенном порядке (рис. 3.3). Такое полное условное обозначение должно быть указано на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами.

Во всех видах документации приводится сокращенное условное обозначение электродов, которое содержит их марку, диаметр и группу, а также обозначения стандарта (ГОСТ 9466—75) или технических условий на электроды конкретной марки.

Например, для электродов типа Э46А (по ГОСТ 9467—75), марки УОНИ-13/45, диаметром 3 мм, для сварки углеродистых и низколегированных сталей У, с толстым покрытием Д, 2-й группы, с установленной по ГОСТ 9467—75 группой индексов 43 2, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, с основным покрытием Б, для сварки во всех пространственных положениях 1, на постоянном токе обратной полярности 0 полное обозначение имеет вид, представленный на рис. 3.3, а сокращенное обозначение в технических документах имеет вид: «Электроды УОНИ-13/45-3,0-2 ГОСТ 9466—75».

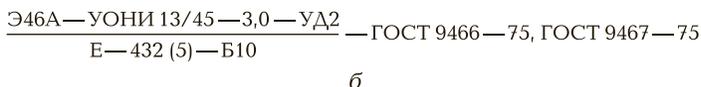
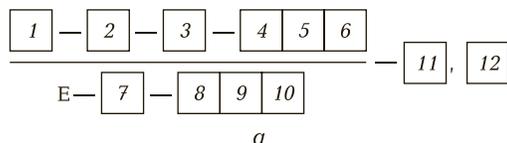


Рис. 3.3. Структура условного обозначения покрытых электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей согласно ГОСТ 9466—75 (а) и пример маркировки электрода типа Э64А (б):

1 — тип; 2 — марка; 3 — диаметр; 4 — назначение; 5 — обозначение толщины покрытия; 6 — группа; 7 — группа индексов, указывающая характеристики наплавленного металла и металла швов по ГОСТ 9466—75, ГОСТ 10052—75 или ГОСТ 10051—75; 8 — обозначение вида покрытия; 9 — обозначение допустимых пространственных положений сварки или наплавки; 10 — обозначение рода применяемого при сварке или наплавке тока, полярности постоянного тока и номинального напряжения источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц; 11 — стандарт по классу стали (ГОСТ 9466—75); 12 — стандарт на тип электрода

### Обозначение электродов для сварки теплоустойчивых сталей.

В ГОСТ 9467—75 предусмотрено девять типов электродов для сварки теплоустойчивых сталей. В основу классификации электродов положены химический состав наплавленного металла и его механические свойства: временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и ударная вязкость.

Обозначения типов электродов состоят из индекса Э (электроды для дуговой сварки) и следующих за ним цифр и букв. Две первые цифры соответствуют среднему содержанию углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Среднее содержание основных химических элементов указано в процентах после буквенных обозначений химических элементов: А — азот; Б — ниобий; В — вольфрам; Г — марганец; К — кобальт; М — молибден; Н — никель; Р — бор; С — кремний; Т — титан; Ф — ванадий; Х — хром.

У электродов для сварки теплоустойчивых сталей вводится дополнительный индекс, указывающий максимальную температуру, при которой нормированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва (0 — ниже 450; 1 — 450...465;

2 — 470...485; 3 — 490...505; 4 — 510...525; 5 — 530...545; 6 — 550...565; 7 — 570...585; 8 — 590...600; 9 — свыше 600).

**Обозначение электродов для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами.** В ГОСТ 10052—75 установлено 49 типов электродов для сварки хромистых и хромоникелевых сталей, коррозионно-стойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситно-ферритного, ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитного классов. В основу классификации электродов положены химический состав и механические свойства наплавленного металла. Для некоторых типов электродов нормируется также содержание в структуре металла шва ферритной фазы, его стойкость к межкристаллитной коррозии и максимальная температура, при которой регламентированы показатели длительной прочности металла шва.

Две первые цифры в обозначении типов электродов, следующие за буквой Э, указывают среднее содержание углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, показывают среднее содержание элемента в процентах. Если содержание элемента в наплавленном металле менее 1,5 %, то цифры не представляют. При среднем содержании в наплавленном металле кремния до 0,8 % и марганца до 1,6 % буквы С и Г не ставят (например, тип Э-12Х11НВМФ). Приведенные показатели механических свойств характеризуют металл после сварки либо после термообработки.

Если структура наплавленного металла не двухфазная, то числовой индекс, характеризующий наплавленный металл, будет содержать только три цифры. Буква Б означает, что покрытие основное; цифра 3 — электрод пригоден для сварки в нижнем горизонтальном на вертикальной плоскости и в вертикальном снизу вверх положениях; 0 — для сварки на постоянном токе обратной полярности.

**Обозначение электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.** В ГОСТ 10051—75 регламентировано 43 типа электродов для наплавочных работ. В этом стандарте установлен химический состав наплавленного металла и его твердость. Принцип обозначения химического состава наплавленного металла прежний: среднее содержание углерода приведено в сотых долях процента, а основных химических элементов — в процентах после буквенных символов. В зависимости от типа электрода показатели твердости наплавленного металла относятся к его состоянию либо непосредственно после наплавки, либо после термообработки.

Для характеристики твердости наплавленного металла предусмотрены два цифровых индекса. Первая цифра характеризует твердость HRC: 0 — не менее 19; 1 — 19...27; 2 — 28...33; 3 — 34...38; 4 — 39...44; 5 — 45...50; 6 — 51...56; 7 — 57...60; 8 — 61...63; 9 — свыше 63. Вторая цифра показывает условия получения регламентируемой твердости: 1 — непосредственно после наплавки; 2 — после термообработки.

### 3.5. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЧУГУНА

Электроды для ручной сварки меди, алюминия и сплавов изготавливают по стандартам в соответствии со специальными техническими условиями.

Металлические стержни электродов для сварки меди и ее сплавов изготавливают из сварочной проволоки и прутков, состав которых регламентирует ГОСТ 16130—90, или из литых стержней другого состава. Покрытия могут содержать те же компоненты, что и покрытия электродов для сварки сталей (шлакообразующие, раскислители и т.д.). Сухую шихту замешивают на жидком стекле.

Металлические стержни электродов для сварки алюминия и его сплавов получают из сварочной проволоки в соответствии с ГОСТ 7871—75. Основой покрытия служат галоидные соли щелочных и щелочно-земельных металлов, а также криолит. Сухую шихту замешивают на воде или водном растворе поваренной соли, так как при использовании жидкого стекла, химически взаимодействующего с компонентами шихты, замес быстро твердеет. Кроме того, кремний, восстанавливаясь из жидкого стекла и проникая в металл шва, ухудшает его свойства.

Металлические стержни электродов для сварки чугуна изготавливают из стали или медно-никелевых сплавов. Кроме того, они могут быть комбинированными (например, медно-стальными, железоникелевыми). Для покрытия этих электродов используют те же компоненты, что и для стальных электродов. В покрытие электродов со стальным стержнем вводят углерод, кремний и другие графитизаторы, а также титан, ванадий и другие карбидообразующие. Применяют и электроды, металлические стержни которых изготовлены из чугуна, отлитого в кокиль или песчаную форму. Сухие компоненты покрытия замешивают на жидком стекле.

## 3.6. УПАКОВКА И ХРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ

Покрyтия электродов содержат соединения кальция, органические компоненты и другие гигроскопические добавки, которые усваивают влагу из воздуха. При сварке отсыревшими электродами ухудшается стабильность горения дyги, шов насыщается диффузионным водородом, что приводит к образованию пор и трещин. На содержание влаги в покpытии влияют влажность и температура окружающей среды, а также продолжительность пребывания электродов на воздухе, поэтому хранить их следует в герметичной упаковке.

По российским стандартам разрешается поставлять электроды:

- в герметичных пластмассовых коробках (пеналах);
- герметичных металлических коробках, которые содержат пачки электродов, упакованных в оберточную бумагу;
- коробках из картона, герметично закрытых полиэтиленовой пленкой;
- пачках, завернутых во влагостойкую бумагу и уложенных в коробки из картона.

Масса электродов в пачке не должна превышать 3; 5 и 8 кг при их диаметре не более 2,5; 3...4 и свыше 4,0 мм соответственно.

Каждая коробка или пачка с электродами должна быть снабжена этикеткой или маркировкой, содержащей следующие данные:

- наименование или товарный знак изготовителя;
- номер партии электродов, дата ее изготовления;
- масса электродов в коробке или пачке;
- условное обозначение;
- область применения;
- режимы сварочного тока в зависимости от диаметра электродов и пространственного положения сварки или наплавки;
- особые условия выполнения сварки или наплавки;
- механические и специальные свойства металла шва, наплавленного металла или сварного соединения, не указанные в условном обозначении электродов;
- допустимое содержание влаги в покpытии перед их использованием;
- режим повторного прокаливания электродов.

Перечисленные данные (за исключением двух первых позиций) должны соответствовать стандартам или техническим условиям на электроды конкретной марки.

Пачки или коробки с электродами следует укладывать в ящики из картона, древесно-волоконистых плит толщиной 4 мм или дерева. Масса брутто упаковочных мест в ящиках из указанных материалов не должна превышать соответственно 32; 50 и 80 кг. Кроме того, разрешается укладывать их в ящичные металлические поддоны закрытого типа и крупногабаритные деревянные ящики. В этом случае масса брутто не должна превышать 1 100 кг, а высота упаковки — 600 мм. По соглашению изготовителя с потребителем пачки и коробки с электродами допускается помещать в универсальные среднетоннажные контейнеры при условии их полной загрузки и установки полок между ярусами, причем высота яруса не должна превышать 600 мм.

На каждый ящик (поддон) наносят транспортную маркировку, содержащую манипуляционные знаки «Осторожно, хрупкое» и «Бойтся сырости», а на одну из его боковых поверхностей наклеивают этикетку, аналогичную предусмотренной для пачек и коробок с электродами.

Каждая партия электродов сопровождается сертификатом, удостоверяющим соответствие электродов требованиям ГОСТ 9466—75 и стандарта или техническим условиям на электроды данной марки. В сертификате должны содержаться: наименование или товарный знак изготовителя; условное обозначение электродов; номер партии и дата изготовления; масса нетто партии в килограммах; марка проволоки электродных стержней с указанием обозначения стандарта или технических условий; фактический химический состав наплавленного металла; фактические значения показателей механических и специальных свойств (характеристик) металла шва, наплавленного металла или сварного соединения, являющиеся приемосдаточными характеристиками электродов конкретной марки.

### 3.7. ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ ПОД СВАРКУ

Подготовку свариваемых кромок деталей большой толщины выполняют кислородной резкой или обработкой на строгальных или фрезерных станках; для подготовки тонколистового металла используют кромкогибочные прессы или специальные станки.

Гибку деталей и заготовок проводят на металлогибочных вальцах. Здесь же изготавливают обечайки для сварки различных емкостей цилиндрической формы.

Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из сталей, выполняемых ручной дуговой сваркой, установлены ГОСТ 5264—80, в котором предусмотрено четыре типа соединений в зависимости от толщины свариваемых деталей. По форме подготовленных кромок соединения бывают с отбортовкой кромок, без скоса кромок и со скосом кромок. Выполнять швы можно как с одной стороны соединений (односторонние), так и с двух сторон (двухсторонние).

При расположении свариваемых деталей под углом основные типы, конструктивные элементы и размеры швов сварных соединений установлены ГОСТ 11534—75, в котором предусмотрены формы подготовки кромок и размеры выполнения швов угловых и тавровых соединений.

Подготовка кромок под сварку включает в себя их тщательную очистку от ржавчины, окалины, краски, масла и других загрязнений поверхности. Кромки очищают стальными вращающимися щетками, гидropескоструйным и дробеметным способами, шлифовальными кругами, пламенем сварочной горелки, травлением в растворах кислот и щелочей.

Подготовленные детали собирают под сварку. При сборке следует выдержать необходимые зазоры и требуемое совмещение кромок. Точность сборки проверяют шаблонами, измерительными линейками и щупами (рис. 3.4). Сборку выполняют в специальных приспособлениях или на выверенных стеллажах. Временное закрепление деталей проводят струбцинами, скобами или прихваткой короткими швами. Число прихваток и их размер определяют в зависимости от технологических условий.

Свариваемые детали размещают в приспособлении по правилам базирования. *Базирование* — это такое размещение детали в приспособлении, при котором поверхности детали (технологические базы) опираются на установочные поверхности приспособления.

Рассмотрим основные схемы базирования деталей. Призматическая деталь должна базироваться на три базы в трехмерной системе координат. На установочной плоскости деталь фиксируют в трех точках (рис. 3.5), на направляющей — по двум, на опорной — в одной точке. Таким образом, если зафиксировать деталь во всех шести точках, то она будет находиться в строго определенном положении.

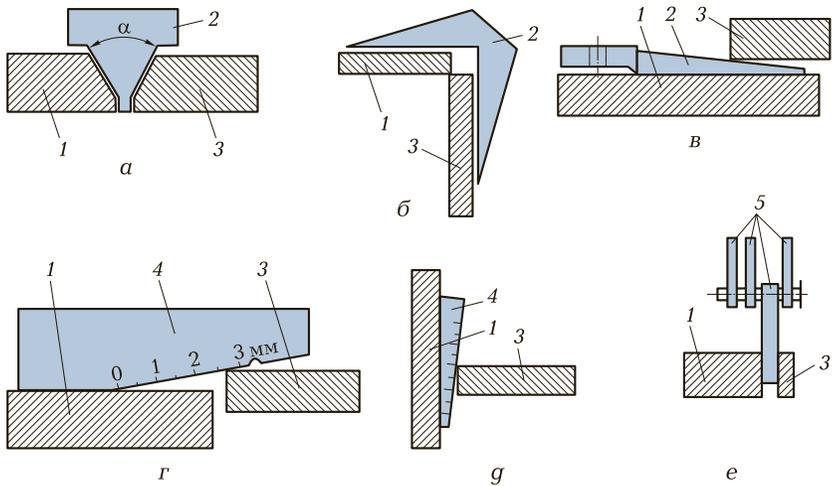


Рис. 3.4. Контроль качества сборки деталей к сварке с использованием:

*а* — шаблона для проверки угла  $\alpha$  разделки кромок; *б* — шаблона для проверки прямого угла между кромками; *в* — шаблона для проверки зазора между кромками; *г* — измерительной линейки для определения превышения кромки; *д* — измерительной линейки для измерения зазора в тавровом соединении; *е* — щупа для определения зазора в стыковом соединении; 1, 3 — свариваемые детали; 2 — шаблон; 4 — измерительная линейка; 5 — щупы

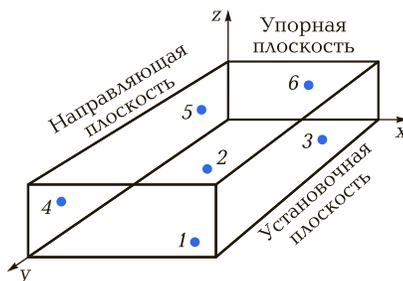


Рис. 3.5. Трехмерное базирование детали прямоугольной призматической формы:

1—3 — точки базирования на установочной плоскости; 4, 5 — точки базирования на направляющей плоскости; 6 — точки базирования на упорной плоскости

Цилиндрические детали обычно базируют по призме (рис. 3.6). Деталь лишена возможности перемещаться во всех направлениях, за исключением вращения вокруг продольной оси. Если зафиксировать цилиндрическую деталь от возможного вращения вокруг продольной оси, то она будет находиться также в строго определенном положении. Детали с цилиндрическими отверстиями базируют, как правило, по пальцам-фиксаторам приспособления, которые входят в основания детали. Второй базой обычно служит плоскость детали, перпендикулярная оси отверстия.

Установочные элементы — упоры. Их применяют для точной установки деталей сварного узла в сборочных приспособлениях. Конструкция упоров должна обеспечивать удобную установку деталей в приспособление, доступ к сварному шву и не должна мешать съему изделия после сварки. Прочность и жесткость упоров должны предотвращать деформацию изделий в процессе сварки.

Зажимные элементы, к которым относятся прижимы и зажимы, предназначены для закрепления деталей свариваемого изделия в процессе сборки и сварки без сдвигов относительно установочных баз. Конструкции прижимов и зажимов должны обеспечивать быстродействие и безопасность работы. Переносные сборочные приспособления применяют при сборке сварных узлов в том случае, когда невозможно применить для этих целей типовые приспособления. К переносным приспособлениям относятся струбцины, стяжки, специальные фиксаторы, распорки, домкраты и др. Наиболее часто применяют струбцины, которые служат для прижима двух и более деталей друг к другу (прижимные) или

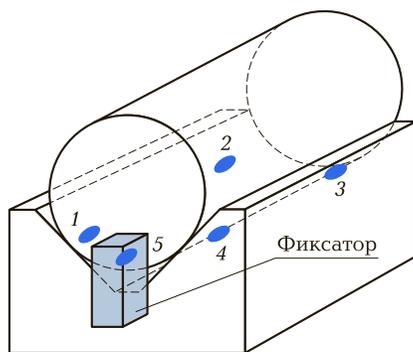


Рис. 3.6. Базирование детали цилиндрической формы:  
1—4 — точки опоры на плоскостях призмы; 5 — точка фиксации

для установки и закрепления деталей (установочные) в определенном положении (рис. 3.7). Установочная струбцина состоит из двух винтовых струбцин и гайки с правой резьбой, которую называют талрепом.

В опытном или мелкосерийном производстве для изготовления сварных узлов или конструкций применяют сборно-разборные приспособления. Такие приспособления собирают из типовых блоков-плит, которые имеют пазы для установки прижимных устройств. Блоки-плиты собирают в комплект по размерам сварного изделия. Для сварки мелких деталей и узлов применяют сварочные столы с аналогичными пазами для закрепления деталей перед сваркой. При установке свариваемых узлов в удобное для сварки положение вместо сварочных столов применяют манипуляторы.

Манипуляторы позволяют вращать собранный под сварку узел с заданной скоростью при сварке деталей цилиндрической формы, а также изменять угол наклона оси вращения. Для сварки крупногабаритных листовых конструкций применяют различные кондукторы, стенды и кантователи. При сборке конструкций помимо применения сборочных приспособлений, кондукторов и кантователей для фиксации взаимного расположения элементов конструкций и деталей часто применяют прихватки (короткие швы), выполненные дуговой сваркой. Длина швов-прихваток составляет обычно 10... 100 мм.

Размеры сечений прихваток не должны превышать  $1/3$  основных швов (при толщине свариваемого металла более 5 мм). Поверхность прихваток следует зачищать от шлака и загрязнений.

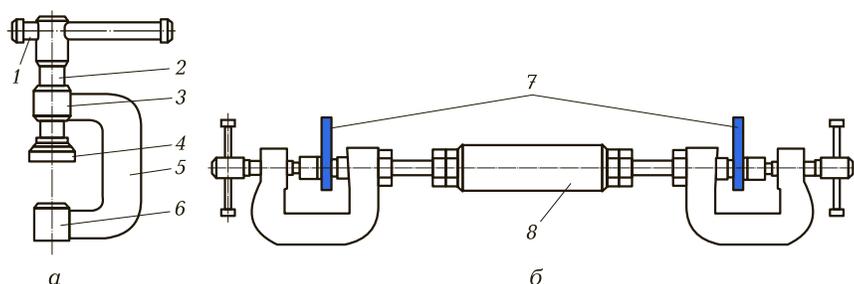


Рис. 3.7. Прижимная (а) и установочная (б) струбцины:

- 1 — рукоятка; 2 — винт; 3 — гайка; 4 — пята; 5 — корпус;
- 6 — упор; 7 — детали, зафиксированные в заданном положении;
- 8 — талреп

При выявлении дефектов их удаляют абразивным инструментом и прихватки выполняют вновь.

Собранные под сварку изделия контролируют в основном по сопрягаемым и габаритным размерам. Изделия после сварки контролируют по техническим условиям на свариваемое изделие, в которых указаны требования к качеству сварных швов и их размерам.

### 3.8. ВЫБОР РЕЖИМА ПРИ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Под *режимом сварки* понимают совокупность контролируемых параметров, при которой обеспечивается устойчивое горение дуги и получение швов заданных размеров, формы и свойств. Параметры режима подразделяются на основные и дополнительные. К основным параметрам относятся диаметр электрода, сила сварочного тока, его род и полярность, напряжение дуги; к дополнительным — состав и толщина покрытий, положение шва в пространстве, число проходов.

Диаметр электродов выбирают в зависимости от толщины металла, катета шва, положения шва в пространстве. Примерное соотношение между толщиной металла  $S$  и диаметром электрода  $d$  при сварке шва в нижнем положении следующее:

$S$ , мм .....	1 ... 2	3 ... 4	5 ... 10	12 ... 24	30 ... 60
$d$ , мм .....	2 ... 3	3 ... 4	4 ... 5	5 ... 6	6 и более

Вертикальные, горизонтальные и потолочные швы независимо от толщины свариваемого металла выполняют электродами небольшого диаметра (до 4 мм), так как при этом меньше стекание жидкого металла и шлака из сварочной ванны.

Силу сварочного тока обычно устанавливают в зависимости от выбранного диаметра электрода. При сварке швов в нижнем положении силу тока подсчитывают, пользуясь эмпирической формулой

$$I_A = Kd, \quad (3.9)$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от диаметра электрода;  $d$  — диаметр электрода, мм.

Величина  $K$  с учетом  $d$  изменяется в следующих пределах:

$d$ , мм .....	2	3	4	5	6
$K$ .....	25 ... 30	30 ... 45	35 ... 50	40 ... 45	45 ... 60

**Таблица 3.2. Режимы ручной дуговой сварки стыковых соединений (в нижнем положении) листовой стали**

Толщина листа, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Толщина листа, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А
1...4	1,5	25...40	6...12	4	160...200
	2	60...70		5	220...280
3	3	100...140	13 и более	5	220...280
4...5	3	100...140		6	280...340
	4	160...200		7	350...400

При сварке на вертикальной плоскости силу тока уменьшают на 10...15%, а в потолочном положении — на 15...20% по сравнению со значением, выбранным для нижнего положения. Род тока и полярность устанавливают в зависимости от вида свариваемого металла и его толщины. При сварке постоянным током обратной полярности на электроде выделяется больше теплоты. Режимы ручной сварки стыковых соединений листовой стали приведены в табл. 3.2.

Напряжение дуги при ручной дуговой сварке изменяется от 20 до 36 В и при расчетах режима не регламентируется. Ручную сварку можно проводить во всех пространственных положениях шва, однако предпочтительнее сварка в нижнем положении.

### 3.9. СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ШВОВ

Технология ручной дуговой сварки предусматривает выполнение следующих операций: возбуждение дуги, перемещение электрода в процессе сварки, порядок наложения швов в зависимости от особенностей сварных соединений.

В процессе сварки необходимо поддерживать постоянную длину дуги. Длинная дуга способствует более интенсивному окислению и азотированию расплавленного металла, увеличивает разбрызгивание, а при сварке покрытыми электродами основного типа приводит к пористости металла.

Для образования сварного шва электроду придается сложное движение в трех направлениях. Во-первых, это поступательное

движение электрода в направлении его оси со скоростью его плавления, что обеспечивает поддержание определенной длины дуги. Во-вторых, это движение электрода вдоль оси шва со скоростью сварки. В результате этих двух движений образуется узкий, шириной не более 1,5 диаметра электрода, так называемый ниточный шов. Такими швами сваривают тонкий металл, а также корень шва при многослойной (многопроходной) сварке. В-третьих, это колебание конца электрода перпендикулярно оси шва, которое необходимо для образования валика определенной ширины, хорошего провара кромок и замедления остывания сварочной ванны. Колебательные движения электрода перпендикулярно оси шва (рис. 3.8) могут быть различными (в зависимости от формы, размеров и положения шва в пространстве).

При обрыве дуги в металле образуется кратер, являющийся местом скопления неметаллических включений и преимущественного зарождения трещин. В связи с этим при повторном зажигании дуги, например при смене электрода, следует переплавить застывший металл кратера и только после этого продолжить процесс сварки. Заканчивают сварку заваркой кратера. Для этого электрод держат неподвижно до естественного обрыва дуги или быстро укорачивают дугу вплоть до частых коротких замыканий, после чего ее резко обрывают.

При сварке встык без скоса кромок шов должен иметь небольшое уширение с одной или с двух сторон стыка. Стыковые соединения со скосом одной или двух кромок сваривают одно- или многослойными швами. При сварке однослойным швом дугу возбуждают на краю скоса кромок, а затем, переместив ее вниз, проваривают корень шва. На скосах кромок движение электрода

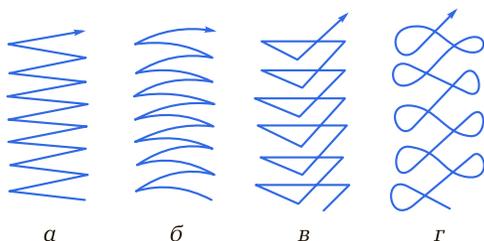


Рис. 3.8. Направление колебательных движений электрода перпендикулярно оси шва при ручной дуговой сварке:  
*а, б* — обычный режим сварки; *в, г* — сварка с усиленным прогревом кромок

замедляют, чтобы лучше их проварить. При переходе дуги с одной кромки на другую скорость движения электрода увеличивают во избежание прожога в зазоре между кромками.

Сварку многослойных швов начинают, тщательно проваривая корень шва электродом диаметром не более 4 мм, а последующие швы наплавляют уширенными валиками, используя электроды большего диаметра. Число слоев при сварке стыковых швов выбирается по следующему соотношению:

Толщина листа, мм .....	1—5	6	8	10	12	14	16	18
Число слоев .....	1	2	2—3	3—4	4	4—5	5—6	5—6

Сварку соединений ответственных конструкций большой толщины (свыше 25 мм) в случае появления объемных напряжений и возрастания опасности образования трещин выполняют с применением специальных приемов заполнения швов блоками или каскадом (рис. 3.9). При сварке каскадом сначала в разделку кромок наплавляют первый слой небольшой длины 200...300 мм, затем второй слой, перекрывающий первый и имеющий примерно в 2 раза большую длину. Третий слой перекрывает второй; он длиннее его на 200...300 мм. Так наплавляют слои до тех пор, пока на небольшом участке над первым слоем разделка не будет заполнена. Затем от этого участка сварку ведут в разные стороны короткими швами тем же способом. Таким образом, зона сварки все время находится в горячем состоянии, что предупреждает появление трещин. При блочном методе используют обратноступенчатую сварку, при которой многослойный шов выполняют отдельными участками с полным заполнением каждого из них.

Угловые швы применяют при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений. Сварку угловых швов проводят «в лодочку» или наклонным электродом.

При сварке угловых швов «в лодочку» наплавленный металл располагается в желобке, образуемом стенкой и полкой. Это обеспечивает правильное формирование шва и хороший провар

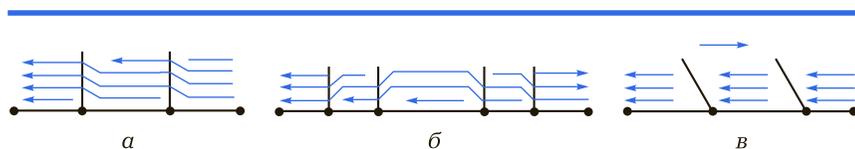


Рис. 3.9. Способы заполнения разделки кромок:

*а, б* — соответственно односторонним и двусторонним каскадами;  
*в* — блоками

его корня и стенки без опасности подрезов, а также дает возможность наплавлять за один проход швы большого сечения. Однако не всегда можно установить детали в положение «в лодочку» (рис. 3.10, а).

В большинстве случаев тавровые соединения сваривают в положении, когда одна деталь соединения расположена горизонтально, а вторая — вертикально. Сварку угловых швов при таком положении проводят наклонным электродом (рис. 3.10, б). При этом возможно неполное проплавление корня шва или кромки горизонтальной детали. Во избежание непровара дугу возбуждают на горизонтальной полке, отступив от границы шва на 3...4 мм. Затем дугу перемещают к вершине шва, где ее немного задерживают для лучшего провара его корня, и поднимают вверх, проваривая вертикальную полку. Этот же процесс после некоторого перемещения электрода вперед повторяют и в обратном направлении. Угол наклона электрода в процессе сварки изменяют в зависимости от того, где в данный момент горит дуга. Начинать процесс сварки на вертикальной стенке нельзя, так как в этом случае расплавленный металл с электрода будет натекает на еще холодный основной металл горизонтальной полки, в результате чего образуется непровар. На вертикальной стенке возможно образование подрезов.

При многослойной сварке для лучшего провара корня шва первый слой выполняют узким или ниточным швом электродом диаметром 3...4 мм без колебательных движений. При наплавке швов с катетами более 8 мм сварку ведут в два слоя и более (рис. 3.10, в).

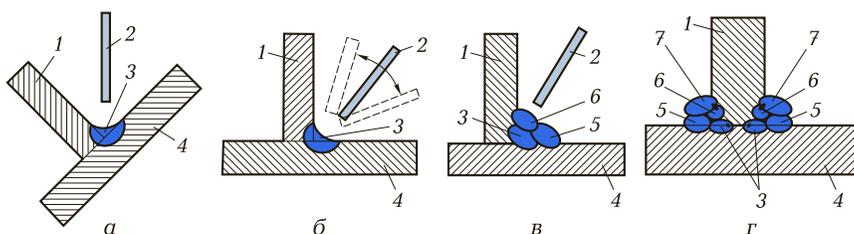


Рис. 3.10. Сварка угловых соединений тавровых балок:

а — однослойным швом «в лодочку»; б — однослойным швом с отклонением электрода; в — многослойным швом; г — двумя многослойными швами; 1 — стенка; 2 — электрод; 3 — корневой (первый) слой; 4 — полка; 5, 6 — второй и третий слои шва; 7 — четвертый слой (штриховой линией обозначены последовательные положения электрода при сварке по варианту «б»)

Далее приведено число слоев при сварке угловых швов в зависимости от толщины свариваемого металла:

Толщина

свариваемого

металла, мм ..... 1—5 6 8 10 12 14 16 18 20 22

Число слоев ..... 1 1 1—2 2 2—3 3—4 5 5—6 5—6 6—7

Угловые швы при одностороннем или двухстороннем скосе кромок вертикального элемента (рис. 3.10, г) сваривают в один или несколько слоев в зависимости от толщины свариваемого металла.

При сварке листов толщиной 0,5...3,0 мм возможно сквозное проплавление металла электрической дугой (прожог) с образованием отверстий, плохо поддающихся последующей заварке. Вместе с тем из-за трудности регулирования нагрева кромок помимо прожогов в таких швах образуются непровары, свищи и пр. Для обеспечения необходимого качества сварки тонколистового металла применяют отбортовку кромок, временные теплоотводящие подкладки, остающиеся подкладки или расплавляемые элементы, электроды со специальным покрытием и специальное сварочное оборудование.

Сварку с отбортовкой кромок выполняют главным образом на постоянном токе. Хороших результатов достигают при установке деталей в полувертикальное положение при сварке на спуск. Для подбора диаметра электрода и силы тока при сварке тонколистовой стали можно пользоваться данными, приведенными в табл. 3.3.

В качестве временных теплоотводящих подкладок используют массивные медные и бронзовые плиты (бруски). Сборку встык осуществляют без зазора, обеспечивая плотное прилегание свариваемых листов к подкладке.

**Таблица 3.3. Диаметр электрода и сила тока при сварке стыковых соединений тонколистовой стали**

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А
0,5	1	10...20
1	1,6...2	30...35
1,5	2	35...45
2	2,5	50...65
2,5	2,5...3	65...100

По протяженности швы подразделяются на короткие (300... 350 мм), средние (350... 1 000 мм) и длинные (свыше 1 000 мм). Короткие швы сваривают от одного конца шва к другому (напроход); швы средней длины — от середины соединения к концам; длинные швы — обратноступенчатым способом, при котором сварной шов выполняют следующими один за другим участками в направлении, обратном приращению шва (рис. 3.11). Длина ступени (участка) — 100... 350 мм (при сварке тонкого металла короткие и более длинные — при сварке толстого металла).

Обратноступенчатую сварку ведут в общем направлении А от середины к концам. Сварка может выполняться одним или двумя сварщиками (рис. 3.11, г, участки 1, 1а, 2, 2а). При выполнении многослойных швов также используют обратноступенчатый спо-

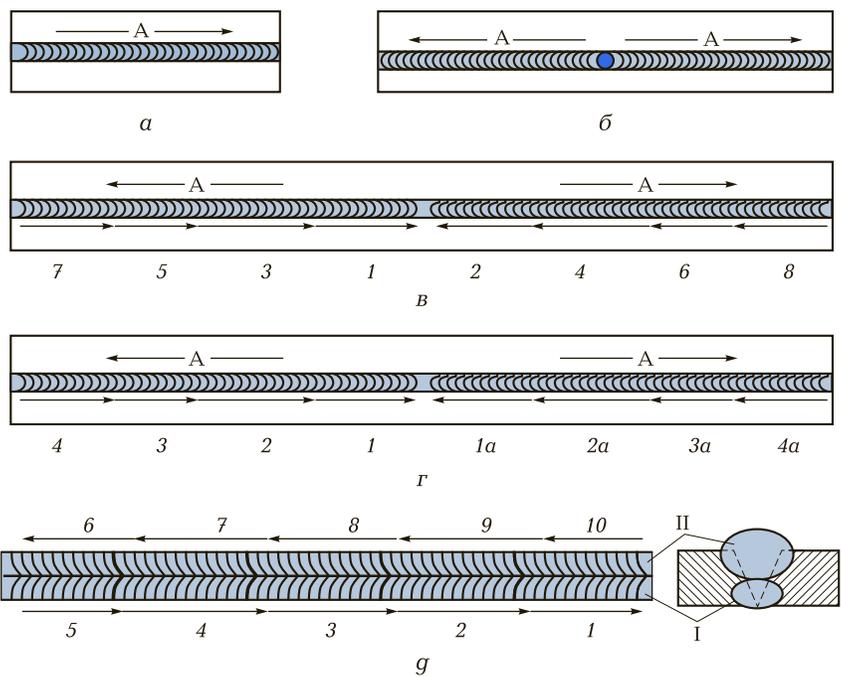


Рис. 3.11. Способы выполнения сварных швов:

а — сварка «напроход»; б — сварка от середины к концам;  
 в—д — выполнение протяженных швов обратноступенчатым способом; 1—10, 1а—4а — последовательность движений электрода в порядке и направлении ведения сварки (показано стрелками); А — общее направление сварки; I, II — слои шва

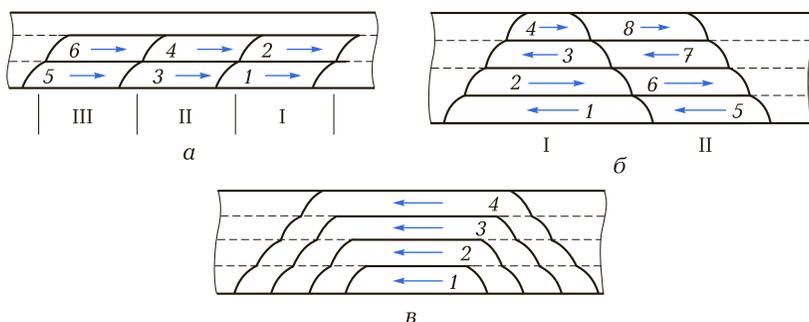


Рис. 3.12. Сварка металлических частей большой толщины:

а — двойным слоем; б — блоками; в — каскадом; I—III — участки сварного шва; 1—8 — последовательность выполнения сварки разными методами

соб, при котором смежные участки вышележащих слоев сваривают в направлении, обратном сварке нижележащих швов. Концы швов смежных участков должны быть смещены на 25...30 мм.

С увеличением толщины металла (свыше 15...20 мм) в сварных соединениях возрастают объемные сварочные напряжения, которые создают опасность возникновения и развития в швах трещин. Во избежание таких явлений сварку толстолистовой стали выполняют различными способами (рис. 3.12). Металл толщиной 15...20 мм сваривают двойным слоем. На участке I (рис. 3.12, а) длиной 250...300 мм наплавливают первый слой шва, немедленно счищают с него шлак и по горячему металлу первого слоя (не ниже температуры 150...200 °С) накладывают второй слой. В такой же последовательности сваривают шов на участках II, III и последующих участках.

Металл толщиной 20...25 мм и более сваривают блоками или каскадом (секциями). При сварке блоками (рис. 3.12, б) многослойный шов выполняют отдельными участками, а промежутки между ними заполняют до того, как будет завершена сварка всего шва. При сварке каскадом (рис. 3.12, в) каждый последующий участок многослойного шва перекрывает весь или часть предыдущего участка.

При U-образной подготовке кромок длина секции каскадной сварки составляет 300...400 мм, при X-образной подготовке — 500...800 мм; при этом каждый слой секции делят на ступени длиной 150...200 мм и выполняют сварку обратноступенчатым способом. При увеличении толщины металла длину секций уменьшают.

Металл толщиной 30 мм и более сваривают одновременно два сварщика, находящихся с противоположных сторон соединения.

### 3.10. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

Различают следующие основные положения швов в пространстве: нижнее, вертикальное, горизонтальное (на вертикальной плоскости) и потолочное. В зависимости от положения в пространстве существенно меняются условия формирования валика шва, его внешний вид и качество, а также производительность сварки.

Нижнее положение наиболее удобно для сварки, так как капли электродного металла легко переходят в сварочную ванну под действием собственной силы тяжести и жидкий металл не вытекает из нее. Кроме того, легко наблюдать за процессом формирования шва. В процессе сварки электрод держат по направлению сварки под углом 10...20°.

При сварке в вертикальном положении расплавленный металл стремится стечь вниз, поэтому вертикальные швы выполняют очень короткой дугой. Вертикальные швы выполняют как снизу вверх, так и сверху вниз. В первом случае дуга возбуждается в самой нижней точке вертикально расположенных пластин и после образования ванны жидкого металла электрод, установленный сначала горизонтально, отводит немного вверх. При этом застывший металл шва образует подобие полочки, на которой удерживаются последующие капли металла. Для предотвращения вытекания жидкого металла из ванны необходимо совершать колебательные движения электродом перпендикулярно оси шва с отводом его вверх и поочередно в обе стороны. Это обеспечивает быстрое затвердевание жидкого металла.

Сварку сверху вниз выполняют при малой толщине металла или при наложении первого слоя шва в процессе многослойной сварки. В этом случае подтекающий под дугу жидкий металл уменьшает возможность образования сквозных прожогов. В начале сварки дуга возбуждается в самой верхней точке пластин при горизонтальном расположении электрода. После образования ванны жидкого металла электрод наклоняют на 15...20° с таким расчетом, чтобы дуга была направлена на основной и наплавленный металл. Для улучшения условий формирования шва амплиту-

да колебаний электрода должна быть небольшой, а дуга — очень короткой, чтобы капли расплавленного металла удерживались от стекания вниз.

Вертикальные швы на металле большой толщины с X-образной подготовкой кромок сваривают начиная с верхней части швов. Когда работают два сварщика, один выполняет первый слой в свариваемой секции и сразу после этого с обратной стороны соединения вырубает корень шва, а другой сварщик накладывает все слои на своей стороне секции. В это время первый сварщик накладывает все слои шва, находящиеся на его стороне секции. В такой же последовательности сваривают все последующие секции. Сварку ведут без перерывов по горячему предыдущему слою.

При выполнении швов в горизонтальном положении для предупреждения стекания жидкого металла скос кромок обычно делают на одной верхней детали. Дуга в этом случае возбуждается на нижней горизонтальной кромке, а затем переносится на приотупление деталей и на верхнюю кромку, поднимая вверх стекающую каплю металла. Колебательные движения электродом совершают по спирали. Горизонтальными сварными швами легче выполнять нахлесточные соединения, чем стыковые, так как горизонтальная кромка листа способствует удержанию расплавленного металла от стекания вниз. Горизонтальные швы большой протяженности при K-образной подготовке кромок (два симметричных скоса одной кромки, обычно верхней) делят на участки с таким расчетом, чтобы два сварщика могли сваривать двухсторонний шов на таком участке в течение одной смены.

Выполнение швов в потолочном положении — трудоемкая операция, потому что сила тяжести препятствует переносу металла с электрода в сварочную ванну, а расплавленный металл стремится вытечь из ванны вниз, поэтому в процессе сварки необходимо добиться, чтобы объем сварочной ванны был небольшим. Этого достигают, применяя электроды малого диаметра (не более 3...4 мм) и небольших сварочных токов. Основное условие получения качественного шва — поддержание самой короткой дуги путем периодических замыканий электрода с ванной жидкого металла. В момент замыкания капля металла под действием сил поверхностного натяжения втягивается в сварочную ванну. В момент удаления электрода дуга гаснет и металл шва затвердевает. Одновременно электроду сообщаются колебательные движения поперек шва. Наклон электрода к поверхности детали должен составлять 70...80° в направлении сварки.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что понимают под режимом сварки покрытым электродом?
2. Каково влияние различных параметров режима сварки на формирование шва?
3. Как различаются сварные швы по длине?
4. Для чего выполняется обратноступенчатая сварка?
5. Какие существуют методы наложения швов при сварке металла большой толщины?
6. Какие электроды применяются при ручной дуговой сварке сталей?
7. Каковы особенности выполнения вертикальных швов?
8. Как маркируются электроды для ручной дуговой сварки?
9. Как осуществляется упаковка электродов?
10. Назовите основные правила хранения покрытых электродов.

## РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

### 4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РУЧНОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Для получения качественных соединений при дуговой сварке необходимо защищать зоны дуги и расплавленного металла от вредного воздействия воздуха. При сварке в защитных газах для защиты зоны дуги и расплавленного металла используют газ (рис. 4.1), подаваемый струей при помощи горелки.

В качестве защитных газов используют инертные газы (аргон, гелий и их смеси), не взаимодействующие с металлом при сварке, и активные газы (углекислый газ, водород и др.), взаимодействующие с металлом, а также их смеси.

Сварку в защитных газах можно выполнять неплавящимся электродом (рис. 4.1, а), при этом дуга горит между неплавящимся электродом и изделием. Электрод в процессе сварки не расплавляется и не попадает в шов. Дуга, передвигаемая вдоль свариваемых кромок, оплавляет их. По мере удаления дуги расплав-

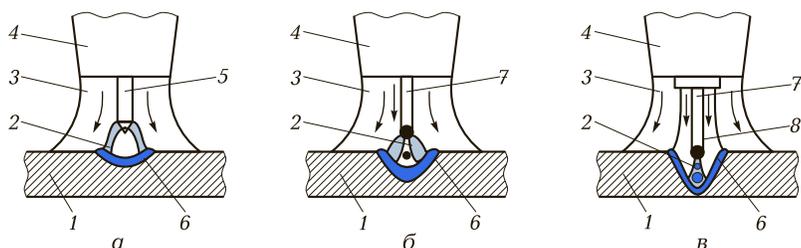


Рис. 4.1. Схемы процессов сварки в защитных газах:

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

ленный металл затвердевает, образуя шов, соединяющий кромки детали.

При сварке плавящимся электродом (рис. 4.1, б) дуга горит между электродной проволокой, непрерывно подаваемой в дугу, и изделием. Дуга расплавляет проволоку и кромки изделия, и образуется общая сварочная ванна. По мере перемещения дуги сварочная ванна затвердевает, образуя шов, соединяющий кромки изделия.

В целях экономии защитного газа и управления процессом сварку ведут в двух отдельных потоках газов, подаваемых концентрично вокруг дуги (рис. 4.1, в). Во внутреннем потоке газа горит дуга и находится капля электродного металла, а жидкая металлическая ванна защищается смесью внутреннего и наружного потоков.

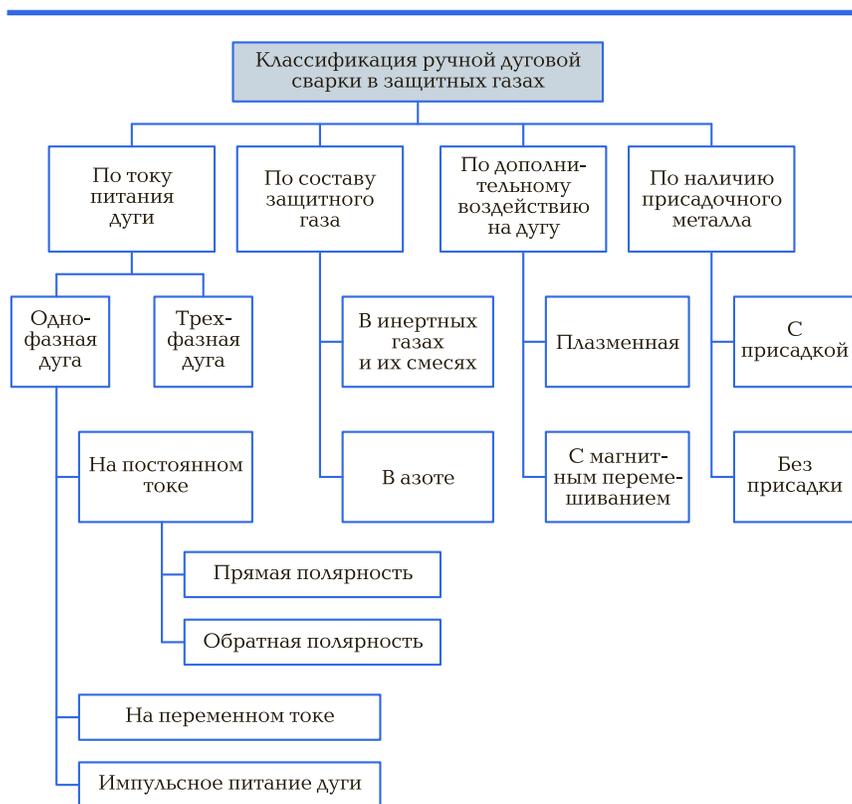


Рис. 4.2. Классификация методов сварки в защитных газах

Основные разновидности ручной сварки в защитных газах плавящимся электродом приведены на рис. 4.2.

Основными параметрами процесса ручной аргонодуговой сварки являются:

- при сварке неплавящимся электродом — ток дуги и расход защитного газа;
- при сварке плавящимся электродом — ток дуги, расход защитного газа и скорость подачи электродной проволоки.

Особенностями дуговой сварки в защитных газах являются:

- высокая концентрация энергии дуги, обеспечивающая минимальную зону термического влияния и небольшие деформации сварного узла;
- высокая производительность процесса; эффективная защита расплавленного металла, особенно при использовании в качестве защитной среды инертных газов;
- отсутствие необходимости применения флюсов или обмазок; возможность сварки в различных пространственных положениях.

## 4.2. СОЗДАНИЕ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ

Наиболее распространена струйная местная защита потоком газа, истекающего из сопла сварочной горелки. Качество струйной защиты зависит от конструкции и диаметра сопла  $1$  (рис. 4.3), расстояния от среза сопла до поверхности  $(L + H)$  свариваемого материала и расхода защитного газа. В строении газового потока различают две области: ядро струи  $2$  и периферийную область  $3$ . При истечении в окружающую воздушную среду в ядре струи сохраняются скорость и состав газа, имеющиеся в сечении на срезе сопла.

Периферийная область потока представляет собой зону, в которой защитный газ смешивается с окружающим воздухом, а скорость по длине потока изменяется от первоначальной (имеющейся на срезе сопла) до нулевой на внешней границе струи, поэтому надежная защита металла может осуществляться только в пределах ядра потока. Чем больше длина  $H$  этого участка, тем выше его защитные свойства. Максимальная длина  $H$  наблюдает-

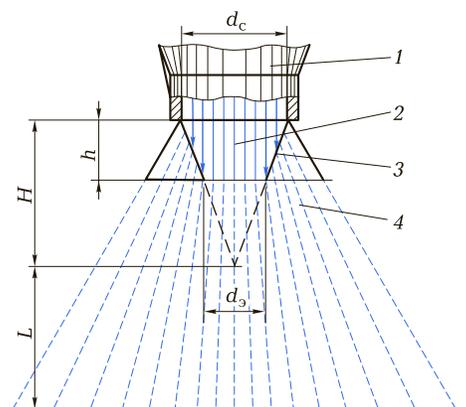


Рис. 4.3. Схема истечения защитного газа из сопла горелки:  
 1 — сопло; 2 — потенциальное ядро струи; 3 — пограничный слой; 4 — периферийный участок струи;  $H$  — вылет ядра за срез сопла;  $h$  — расстояние от среза сопла до уровня, на котором диаметр зоны эффективной защиты равен  $d_s$ ;  $L$  — расстояние от среза сопла до поверхности изделия;  $d_c$  — выходной диаметр сопла

ся при ламинарном истечении газа из сопла. При турбулентном характере истечения газа такое строение потока нарушается и его защитные свойства резко ухудшаются.

На практике применяют конические, цилиндрические и профилированные сопла (рис. 4.4). Для улучшения струйной защиты

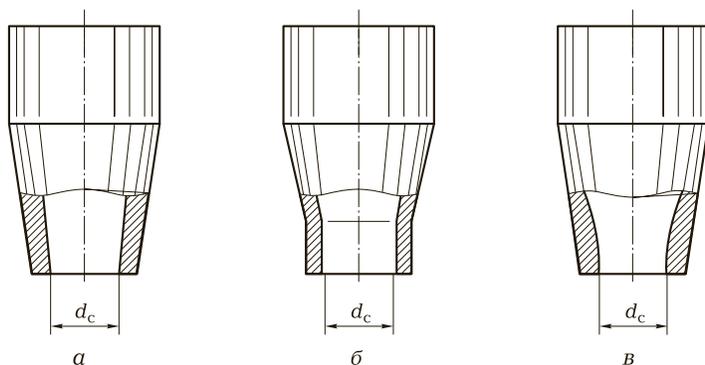


Рис. 4.4. Схемы сопел:  
 а — конического; б — цилиндрического; в — профилированного;  
 $d_c$  — диаметр сопла на срезе

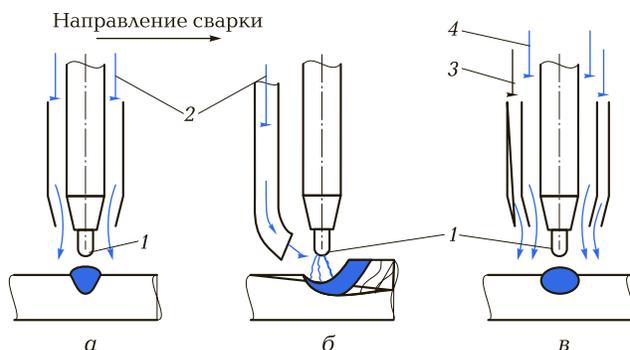


Рис. 4.5. Схемы газовых потоков в зоне сварки:

*а* — центрального; *б* — бокового; *в* — двух концентрических;  
 1 — электрод; 2 — защитный газ; 3, 4 — наружный и внутренний потоки защитного газа

на входе в сопло в горелке устанавливают мелкие сетки, пористые материалы, позволяющие дополнительно выравнивать поток газа на выходе из сопла. Расход защитного газа выбирают таким, чтобы обеспечить истечение струи, близкое к ламинарному истечению.

В качестве защитных газов используют инертные газы (аргон, гелий и их смеси), не взаимодействующие с металлом при сварке, и активные газы (например, углекислый газ), которые взаимодействуют с металлом, а также их смеси.

Сварку в защитных газах можно выполнять неплавящимся (обычно вольфрамовым) или плавящимся электродом. В первом случае сварной шов получается за счет расплавления кромок изделия и, если необходимо, подаваемой в зону дуги присадочной проволоки.

Плавящийся электрод в процессе сварки расплавляется и участвует в образовании металла шва.

В зону сварки защитный газ может поступать концентрично вокруг дуги, а при повышенной скорости сварки плавящимся электродом — сбоку и двумя отдельными потоками (рис. 4.5). При сварке активных материалов в целях предупреждения контактирования воздуха не только с расплавленным, но и с нагретым твердым металлом применяют сопла с увеличенной зоной защиты.

В соплах с увеличенной зоной газовой защиты для создания ламинарного потока инертного газа в корпусе сопла устанавливают рассекаватель в виде мелкоячеистой металлической сетки.

### 4.3. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

**Инертные газы и их свойства.** Аргон — бесцветный, неядовитый газ, почти в 1,5 раза тяжелее воздуха (табл. 4.1). С большинством элементов аргон не образует химических соединений. В металлах аргон нерастворим как в жидком, так и в твердом состоянии.

В промышленности аргон получают из воздуха в разделительных колонках путем избирательного испарения с последующим глубоким охлаждением и фракционной перегонкой. Полученный таким путем аргон содержит некоторое количество кислорода. Поскольку для сварки различных сплавов цветных металлов требуется аргон различной чистоты, промышленность выпускает его трех марок (табл. 4.2).

Аргон марки А рекомендуют использовать при сварке активных и редких металлов и их сплавов (Ti, Zr, Nb); марки Б — для сварки сплавов на основе магния, алюминия; марки В — для сварки коррозионно-стойких, жаропрочных и окалиностойких сталей.

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

Таблица 4.1. Физические свойства газов

Газ	Относительная атомная масса	Относительная молекулярная масса	Плотность, г/м <sup>3</sup> , при 0 °С и 1 033 Па	Температура кипения, °С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость 1 т при 20 °С, Дж/(кг·°С)
Аргон	39,944	—	1,7833	–185,5	187	0,542
Гелий	4,003	—	0,17847	–268,9	1 558	5,213
Азот	14,008	28,016	1,251	–196	251	—
Кислород	16	32	1,429	–183	262	0,9149
Водород	1,008	2,016	0,08988	–259	1 754	—
Воздух	—	29	1,293	–190	280	1,006

**Таблица 4.2. Массовая доля компонентов газообразного аргона, % (ГОСТ 10157–79)**

Марка	Ar, не менее	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Влага
		не более		
А	99,99	0,003	0,01	0,03
Б	99,96	0,005	0,04	0,03
В	99,90	0,005	0,10	0,03

Для сварки плавящимся электродом углеродистых легированных сталей необходим аргон, содержащий 1...5 % O<sub>2</sub>. Такой аргон по составу близок к аргону марки В.

В промышленности гелий применяют в меньших объемах, чем аргон. Гелий не образует химических соединений с большинством элементов. Гелий — бесцветный газ, без запаха и вкуса, не ядовит, хорошо диффундирует через твердые тела, значительно легче воздуха и аргона (см. табл. 4.1). Гелий получают в основном из природных газов путем их сжижения. Для сварки используют гелий высокой чистоты и сорта А (табл. 4.3).

Транспортируют и хранят гелий в газообразном состоянии в стальных баллонах при  $p = 15$  МПа или в сжиженном состоянии при  $p \leq 2$  МПа. Стоимость гелия значительно выше, чем аргона, поэтому применяют его в основном при сварке химически чистых и активных материалов и сплавов, а также сплавов на основе алюминия и магния.

На практике изредка применяют смеси аргона и гелия (50 % Ar + 50 % He и 40 % Ar + 60 % He). Смесь получают смешиванием двух газов, отбираемых из двух отдельных баллонов.

**Таблица 4.3. Массовые доли компонентов гелия, % (ТУ 51-689–75)**

Сорт	He, не менее	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Углеводороды	Ne <sub>2</sub>
		не более				
Высокой чистоты	99,985	0,0025	0,005	0,002	0,003	0,002
А	99,950	0,008	0,02	0,005	0,007	—

В сварочном производстве азот применяется ограниченно. Его используют для сварки меди и ее сплавов, по отношению к которым азот является инертным газом. По отношению к большинству других металлов он является активным газом, часто вредным, и от него стремятся избавиться. Азот — бесцветный неядовитый газ (табл. 4.4).

**Неплавящиеся электроды.** В качестве неплавящегося электрода используют преимущественно стержни из вольфрама. Применяемые вольфрамовые электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949—80. Вольфрамовые электроды могут содержать активирующие добавки оксида лантана (ЭВЛ), иттрия (ЭВИ), диоксида тория (ЭВТ). Эти добавки облегчают зажигание и поддерживают горение дуги, повышают эмиссионную стойкость электрода. Наиболее распространены электроды ЭВЛ и ЭВИ диаметром 0,5...10,0 мм, выдерживающие максимальную токовую нагрузку. Из-за окисления вольфрамовых электродов и их быстрого разрушения для защиты не допускается использовать газы, содержащие кислород.

Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом может выполняться с местной или общей защитой, без подачи или с подачей присадочной проволоки, на постоянном или переменном токе. Большинство металлов сваривают на постоянном токе прямой полярности. Сварку алюминия, магния и бериллия ведут на переменном токе.

При сварке на постоянном токе прямой полярности обеспечиваются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии с электрода, выше его стойкость и допустимый предел силы тока (табл. 4.5). Дуга на прямой полярности легко возбуждается и горит при напряжении 10...15 В в широком диапазоне плотностей тока.

**Таблица 4.4. Объемные доли компонентов азота, %  
(ГОСТ 9293–74)**

Состояние	N <sub>2</sub> , не менее	O <sub>2</sub> , не более
Газообразный:		
электровакуумный	99,9	0,1
1-го сорта	99,5	0,5
2-го сорта	99,0	1,0
Жидкий	96,0	4,0

**Таблица 4.5. Зависимость силы тока от диаметра вольфрамового электрода и рода сварочного тока (защитный газ — аргон)**

Электрод	Род тока	Сила тока, А, при диаметре электрода, мм					
		2	3	4	5	6	7
Чистый вольфрам	Постоянный прямой полярности	50	170	370	470	560	—
	Постоянный обратной полярности	30	40	55	65	85	110
	Переменный	20	50	80	220	260	310
Вольфрам с оксидом лантана	Постоянный прямой полярности	150	250	500	710	1000	—
	Постоянный обратной полярности	35	45	60	80	100	125
	Переменный	100	160	220	280	340	410

Дуга обратной полярности обладает важным технологическим свойством: при ее воздействии на поверхность свариваемого металла происходит очистка поверхности металла, удаление поверхностных оксидов. Процесс удаления поверхностных оксидов получил название катодного распыления (катодной очистки). Это свойство используют при сварке переменным током алюминия, магния, бериллия и их сплавов, имеющих на поверхности прочные оксидные пленки. Удаление пленки происходит в полупериод с обратной полярностью сварочного тока, когда свариваемое изделие является катодом. Таким образом, при сварке вольфрамовым электродом на переменном токе реализуются преимущества дуги прямой и обратной полярностей, обеспечиваются устойчивость электрода и разрушение поверхностных оксидов на изделии.

При сварке на переменном токе рабочий конец вольфрамового электрода затачивают в виде полусферы. При сварке на постоянном токе конец электрода затачивают под углом  $60^\circ$  на длине двух-трех диаметров или в виде четырехгранной пирамиды. Расход вольфрамовых электродов невелик. Для его уменьшения подачу защитного газа следует начинать за 10...15 с до возбуждения дуги, а заканчивать — через 5...10 с после обрыва дуги для охлаждения электрода в струе газа. Для предупреждения загрязнения вольфрамового электрода дугу возбуждают, не касаясь концом электрода изделия, а используя осцилляторы или разряд конден-

саторов, без касания концом электрода изделия или замыкания дугового промежутка угольным стержнем.

**Сварочная проволока из стали.** При сварке сталей в основном используют холоднотянутую стальную сварочную проволоку, изготовленную по ГОСТ 2246—70, который предусматривает изготовление проволоки 75 марок. В зависимости от уровня легирования сварочная проволока (ГОСТ 2246—70) подразделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную.

Низкоуглеродистую проволоку изготавливают шести марок: Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-ЮГА и Св-10Г2. Легированную проволоку изготавливают 30 марок. Высоколегированную проволоку изготавливают 39 марок.

В зависимости от назначения стальную сварочную проволоку подразделяют на проволоку для сварки (наплавки) и проволоку для изготовления электродов (условное обозначение — Э). Подразделение проволоки по назначению обусловлено более жесткими предельными отклонениями по диаметру проволоки для изготовления электродов.

По виду поверхности низкоуглеродистую и легированную проволоку подразделяют на неомедненную и омедненную (О). По требованию потребителя проволока должна изготавливаться из стали, выплавленной электрошлаковым (Ш) или вакуумно-дуговым (ВД) переплавом или в вакуумно-индукционных печах (ВИ).

В условном обозначении сварочной проволоки указывают диаметр и марку проволоки, приведенные выше индексы, характеризующие способ выплавки стали, назначение и вид поверхности проволоки, а также обозначение стандарта.

В низкоуглеродистой и легированной проволоке содержание мышьяка должно быть не более 0,08 %. С согласия потребителя в проволоке марок Св-08 и Св-08А допускается остаточное содержание алюминия до 0,05 %. В низкоуглеродистой проволоке марок Св-08ГА, Св-ЮГА и Св-10Г2 и легированной проволоке (не легированной алюминием) остаточное содержание алюминия не должно превышать 0,05 %.

В проволоке, не легированной молибденом, остаточное содержание молибдена не должно превышать 0,15 % в легированной проволоке и 0,25 % в высоколегированной проволоке.

В проволоке, не легированной титаном, остаточное содержание титана не должно превышать 0,04 % в легированной проволоке и 0,20 % в высоколегированной проволоке. По требованию потребителя в проволоке марок Св-04Х19Н11МЗ и Св-08Х21Н10Г6 остаточное содержание титана не должно превышать 0,10 %.

В легированной проволоке, не легированной ванадием, остаточное содержание ванадия не должно превышать 0,05 %, за исключением проволоки марок Св-08ХЗГ2СМ и Св-10Х5М, в которых остаточное содержание ванадия допускается до 0,08 %.

В проволоке, не легированной медью, остаточное содержание меди не должно превышать 0,25 %. По требованию потребителя остаточное содержание меди должно быть не более 0,20 %.

Проволоку с неомедненной поверхностью поставляют свернутой в мотки. Размеры и масса мотков должны соответствовать данным, приведенным в табл. 4.6.

Проволоку с омедненной поверхностью поставляют в мотках прямоугольного сечения. Для проволок диаметром 1,6...3,0 мм требуемые размеры мотков оговаривают в заказе.

Проволока в мотках (катушках, кассетах) должна представлять собой один отрезок, свернутый перепутанными рядами и плотно увязанный таким образом, чтобы исключить возможность распушивания или разматывания мотка. Концы проволоки должны легко обнаруживаться. Допускается контактная стыковая сварка отдельных кусков проволоки одной плавки; при этом поверхность проволоки в зоне сварного соединения должна соответствовать требованиям ГОСТ 2246—70.

**Таблица 4.6. Размеры и масса мотков проволоки**

Диаметр проволоки, мм	Внутренний диаметр витков мотка проволоки, мм	Масса мотка проволоки, кг, не менее		
		Низкоуглеродистой	Легированной	Высоколегированной
0,3 и 0,5	150...300	2	2	1,5
0,8	200...350	5	5	3,0
1,0 и 1,2	200...400	20	15	10,0
1,4 и 1,5	300...600	25	15	10,0
1,6 и 2,0	300...600	30	20	15,0
2,5 и 3,0	400...600	40	30	20,0
4,0... 10,0	500...750	40	30	20,0
12,0	600...800	40	30	20,0

Примечание. Допускается поставка мотков массой, уменьшенной до 50 % от приведенной, в объеме не более 10 % общей массы проволоки в партии.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, расслоений, плен, закатов, раковин, забоин, окалины, ржавчины, масла и других загрязнений. На поверхности проволоки допускаются риски (в том числе затянутые), царапины, местная рябизна и отдельные вмятины. Глубина указанных пороков не должна превышать предельного отклонения по диаметру проволоки.

На поверхности низкоуглеродистой и легированной проволоки не допускается наличие технологических смазок, за исключением следов мыльной смазки без графита и серы.

С согласия потребителя проволоку марок Св-18ХГС и Св-18ХМА для предохранения от коррозии разрешается покрывать сплошным слоем нейтральной смазки, хорошо растворимой в бензине.

Высоколегированная проволока должна поставляться в травленном и отбеленном состоянии или после термической обработки в инертной атмосфере со светлой, светло-матовой или серой поверхностью, без всяких следов смазки.

Проволока должна быть принята техническим контролем предприятия-изготовителя. Изготовитель должен гарантировать соответствие поставляемой проволоки требованиям ГОСТ 2246—70.

#### **Сварочная проволока из алюминия и алюминиевых сплавов.**

При сварке плавлением алюминия и его сплавов в основном используют тянутую и прессованную сварочную проволоку из алюминия и алюминиевых сплавов, произведенную по ГОСТ 7871—75, который предусматривает изготовление проволоки 14 марок.

Овальность проволоки не должна превышать предельных отклонений по диаметру. Поверхность проволоки диаметром 4 мм и менее подвергают химической обработке. После обработки проволока должна иметь блестящую поверхность с параметрами шероховатости  $Ra < 2,5$  мкм.

Внешний ряд намотанной проволоки должен находиться на расстоянии 5...7 мм от наружного края щек катушек диаметром 100 мм и на расстоянии 10...12 мм от наружного края щек катушек диаметром 200, 300 и 430 мм.

Проволоку из сплавов марок Св-А97, Св-А85Т, Св-А5 и Св-АМц наматывают на катушки в нагартованном состоянии с временным сопротивлением разрыву не менее 100 МПа, а проволоку из сплавов марок Св-АМг3, Св-АМг5, Св-1557, Св-АМг6, Св-АМг63, Св-АМг61, Св-АК5, Св-АК5 и Св-1201 по заказу потребителя наматывают в отожженном или нагартованном состоянии.

Проволока на катушках должна состоять из одного отрезка. Допускается стыковая сварка проволоки одной плавки; при этом проволока в местах сварки должна удовлетворять требованиям стандарта. Проволоку диаметром более 4 мм поставляют в мотках или пучках длиной не менее 1 м, без химической обработки поверхности. Внутренний диаметр мотка должен быть не более 750 мм.

Проволока в мотках должна иметь чистую поверхность, без плен, трещин, закатов, вмятин, заусенцев, расслоений и резких перегибов. Не допускаются местные дефекты поверхности проволоки, глубина которых (при их удалении) превышает предельные отклонения по диаметру. На поверхности проволоки допускаются белые и темные пятна без шероховатостей, а также цвета побежалости.

Проволока поставляется партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки одного диаметра, сплава одной марки, одной плавки и одного состояния. Масса партии не ограничивается.

Катушки с проволокой помещают в полиэтиленовый мешок вместе с контрольным пакетом порошка обезвоженного силикагеля-индикатора и герметизируют при относительной влажности окружающего воздуха менее 20 % в течение 30 мин после химической обработки. Герметичность упаковки оценивают визуально по цвету силикагеля-индикатора. Герметичность следует считать нарушенной, если порошок силикагеля-индикатора имеет розовый цвет.

Герметизированные полиэтиленовые мешки с катушками упаковывают в картонные, пластмассовые или деревянные ящики.

Сварочную проволоку из других алюминиевых сплавов изготавливают по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке.

**Сварочная проволока из меди и сплавов на ее основе.** При сварке, наплавке и пайке меди и ее сплавов используют сварочные проволоку и прутки из меди и сплавов на медной основе, изготовленную по ГОСТ 16130—90.

Сварочную проволоку по указанному стандарту изготавливают из меди и ее сплавов 17 марок: М1; МСр1; МНЖ5-1; МНЖКТ5-1-0,2-0,2; БрКМц3-1; БрОЦ4-3; БрАМцЭ-2; БрОФ6,5-0,15; БрАЖМцЮ-3-1,5; БрХ0,7; БрХНТ; БрНЦр; БрНЦрТ; А63; ЛО60-1; АК62-0,5; АКБ062-0,2-0,04-0,5.

Химический состав проволоки и прутков из меди марок М1; М1р и М3р, бронз марок БрКМц3-1; БрАМцЭ-2; БрАЖМцЮ-3-1,5; БрОЦ4-3 и БрОФ6,5-0,15, латуней марок А63; ЛМц58-2; ЛО60-1 и ЛЖМц59-1-1, а также из сплава марки МНЖ5-1 должен удовлет-

ворять требованиям ГОСТ 859—2001, ГОСТ 493—79, ГОСТ 18175—78, ГОСТ 5017—2005, ГОСТ 15527—2004 и ГОСТ 17217—79 соответственно.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин и расслоений. На поверхности проволоки и прутков не допускаются дефекты (плены, закаты, раковины, царапины, уколы, вмятины и др.), глубина которых (при их удалении) превышает половину предельных отклонений по диаметру. Покраснение поверхности после травления и цвета побежалости браковочным признаком не являются.

Проволока должна поставляться мягкой (М), полутвердой (Пт) и твердой (Т). Например, проволока диаметром 2 мм, марки ЛК62-0,5, мягкая: проволока ЛК62-0,5-М-2 ГОСТ 16130—90.

Проволоку и прутки поставляют партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки или прутков одной марки, одного диаметра и одного состояния поставки. Масса партии не должна превышать 1 000 кг.

В ГОСТ 16130—90 содержится рекомендуемое приложение, в котором указано назначение проволоки и прутков из меди и сплавов на медной основе. Сварочную проволоку из меди и ее сплавов других марок изготавливают по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке.

При сварке никеля и его сплавов используют проволоку диаметром 3...5 мм Н-1 (ГОСТ 2179—75) и НП-1, НП-2 (ГОСТ 492—2006). В качестве присадочного металла применяют также проволоку из сплава НМц-2,5 и нихрома (Х20Н80), изготовленную по ГОСТ 492—2006. Для сварки никеля разработаны специальные комплексно-легированные проволоки, содержащие титан, алюминий, марганец, кремний марок НМцАТЗ-1,5-0,6 и НМцТК1-1,5-2,5-0,15 (ТУ48—21—284—73). Присадочные прутки для сварки свинца и цинка обычно имеют тот же состав, что и основной металл.

Для сварки серебра применяют серебряную проволоку, раскисленную алюминием (0,5...1% Al) или содержащую редкоземельные металлы. При сварке других благородных металлов состав присадочной проволоки не отличается от состава основного металла.

Титановую сварочную проволоку выпускают диаметром 1...7 мм. Проволоку поставляют с чистой и осветленной металлической поверхностью, в травленном и дегазированном состоянии (содержание водорода — не более 0,003%). Проволоку ВТ1-00 применяют для сварки технического титана, а также наряду с

проволокой ВТ2св — для низколегированных  $\alpha$ - и псевдо  $\alpha$ -сплавов, проволоку СПТ-2 и СП-15 — для высокопрочных ( $\alpha + \beta$ )-сплавов.

#### 4.4. ТЕХНИКА РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Дуговой сваркой вольфрамовым электродом можно сваривать разные типы соединений в различных пространственных положениях. Применение этого способа целесообразно для соединения металла толщиной до 5...6 мм, однако его можно использовать и для сварки металла большей толщины. Сварку выполняют без присадочного металла, когда шов формируется за счет расплавления кромок, и с присадочным металлом, подаваемым в зону дуги в виде сварочной проволоки. Как правило, сварку ведут при напряжении дуги 22...34 В; при этом длина дуги должна быть 1,5...3 мм. Вылет конца электрода из сопла не должен превышать 3...5 мм, а при сварке угловых швов и стыковых с разделкой — 5...7 мм.

Ручную сварку металла толщиной до 10 мм выполняют «левым» способом (рис. 4.6). Поток защитного газа должен надежно

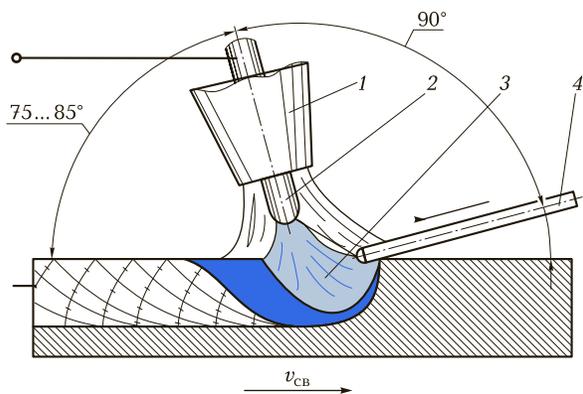


Рис. 4.6. Схема ручной сварки вольфрамовым электродом:

1 — сопло горелки; 2 — вольфрамовый электрод; 3 — сарочная дуга; 4 — присадочный металл;  $v_{св}$  — скорость сварки

охватывать всю область сварочной ванны и разогретую часть присадочной проволоки. При уменьшении толщины свариваемого металла угол между горелкой и изделием уменьшают. Для сварки материала толщиной более 10 мм следует применять «правый» способ сварки, а угол между горелкой и изделием должен быть близок к  $90^\circ$ . Такое положение горелки относительно изделия рекомендуется и при сварке угловых соединений. Проволоку вводят не в столб дуги, а сбоку, и производят ею возвратно-поступательные движения при сварке тонколистового металла. При сварке многослойных швов отдельные валики рекомендуется выполнять не на всю ширину разделки.

Присадочный металл по мере необходимости подается в головную часть сварочной ванны. Сварщик вручную контролирует перемещением сварочной горелки подачу проволоки. Количество присадочного металла, подаваемого в сварочную ванну, выбирают из условия обеспечения требуемой доли участия присадочного металла в образовании шва. При сварке стыковых соединений без разделки кромок присадочный металл необходим в основном для создания выпуклости шва.

Переход присадочного металла в сварочную ванну, минуя дуговой промежутки, исключает его разбрызгивание. Сокращаются потери на испарение и ограничивается взаимодействие расплавленного металла с газами столба дуги. При сварке на постоянном токе дуга горит без треска, щелчков и жужжания.

Основной недостаток процесса — низкая производительность. Другой недостаток — необходима большая практика и высокая квалификация сварщика. К недостаткам процесса сварки неплавящимся вольфрамовым электродом, по сравнению со сваркой покрытым электродом, относится необходимость применения дополнительных защитных мер против световой и тепловой радиации дуги.

Сварка неплавящимся вольфрамовым электродом производится на прямой полярности (минус на электроде). Прямая полярность позволяет получить узкую сконцентрированную дугу, обеспечивающую глубокое проплавление и большую скорость сварки. Электрод получает меньшую часть тепловой энергии дуги и будет иметь меньшую температуру, чем при сварке на переменном токе или при сварке на обратной полярности, что, в свою очередь, позволяет уменьшить диаметр вольфрамового электрода и снизить расход защитного газа.

При обратной полярности поток электронов также движется от отрицательного электрода к положительному, но в данном слу-

чае — от изделия к электроду. Следовательно, больше теплоты сконцентрировано в дуге около вольфрамового электрода. Поскольку электрод получает значительно больше теплоты при сварке на обратной полярности, чем на прямой, для предотвращения перегрева электрода приходится использовать электроды увеличенного диаметра и уменьшать сварочный ток. Свариваемая деталь при сварке на обратной полярности получает меньше теплоты и, следовательно, получается меньшая глубина проплавления.

Некоторые цветные металлы, например алюминий и магний, быстро образуют на поверхности оксидную пленку. Прежде чем сваривать алюминий, необходимо удалить оксидную пленку, температура плавления которой значительно выше температуры плавления основного металла. Удаление оксидной пленки может производиться механически, например щетками, или химически — травлением, но как только пленка удалена, металл тут же снова начинает окисляться, затрудняя сварку.

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

Очищающее действие дуги при сварке на обратной полярности наилучшим образом подходит для сварки алюминия, магния и их сплавов.

Основным требованием для зажигания и горения дуги является ионизация газа в дуговом промежутке. Ионизированный газ является хорошим проводником электрического тока. *Ионизацией* называется процесс, при котором из нейтральных атомов и молекул образуются положительные и отрицательные ионы. В обычных условиях воздух, как и все газы, обладает слабой электропроводностью. Это объясняется малой концентрацией свободных электронов и ионов, поэтому для того чтобы вызвать в воздухе или газе мощный электрический ток, т.е. электрическую дугу, необходимо ионизировать воздушный промежуток (или другую газообразную среду) между электродами.

Ионизацию можно произвести, если приложить к электродам высокое напряжение, тогда имеющиеся в газе (в малом количестве) свободные электроны будут разгоняться электрическим полем и, получив большие энергии, смогут разбить нейтральные атомы и молекулы на ионы.

При сварке в защитном газе теплоты, выделяемой дугой, достаточно для ионизации газа. Однако при сварке на переменном синусоидальном токе при переходе тока через нулевое значение теплоты, выделяемой дугой, становится недостаточно и она гаснет. Для устранения этого явления при сварке на переменном синусоидальном токе и для начального зажигания дуги без короткого замыкания электрода на деталь применяют осцилляторы. Они представляют собой источники высокого напряжения и высокой частоты, способные вызывать искровой разряд между электродом и деталью. Для пробоя межэлектродного промежутка длиной 1 мм в воздухе требуется напряжение около 1...3 кВ.

Как правило, при сварке на переменном токе длина дуги должна быть равна диаметру электрода. При сварке на постоянном токе прямой полярности заостренным концом электрода длина дуги может быть значительно меньше диаметра электрода.

Для того чтобы обеспечить нужный газовый охват зоны сварки, выходной диаметр сопла должен быть не менее трех диаметров вольфрамового электрода.

*Вылет электрода* — это расстояние, на которое выступает из сопла вольфрамовый электрод. Электрод может выступать из торца сопла, но не более выходного диаметра сопла. При большем вылете появляется вероятность прикосновения к сварочной ванне, сварочной проволоке, подаваемой сварщиком, или к боковой поверхности углового шва. Общее правило — начинать сварку нужно с вылета, равного одному диаметру электрода. При сварке корня стыковых и угловых швов вылет электрода увеличивают.

**Зажигание дуги.** Современные установки позволяют производить контактный высокочастотный поджиг дуги и контактное зажигание дуги. Бесконтактное зажигание дуги производится при сварке на переменном токе, контактное — на постоянном токе.

Для бесконтактного зажигания дуги необходимо приблизить электрод горелки к детали, но не касаться его; нажать кнопку включения триггера (при этом произойдут ионизация дугового промежутка и возбуждение дуги). Если в течение 1 с дуга не загорится, то электронная схема отключит осциллятор. Отпустив кнопку триггера и повторно нажав ее, будет сделана вторая попытка возбуждения дуги. В большинстве случаев возбуждение дуги облегчается, если прикоснуться краем сопла к изделию.

При контактном зажигании дуги электрод приближается к детали в месте начала сварки и на 1...2 с слегка касается поверхности детали; при этом происходит разогрев заостренного конца электрода. Затем электрод медленно приподнимается вверх. Ра-

зогретый конец вольфрамового электрода является хорошим источником электронов. Происходят ионизация дугового промежутка и возбуждение дуги. Дуга формируется, когда электрод поднят.

Режим контактного зажигания имеет ограничение сварочного тока при касании электродом изделия. Это предохраняет вольфрамовый электрод от перегрева и прилипания, а металл сварного шва — от загрязнения.

Описанный метод контактного зажигания дуги требует определенного навыка. Более простой метод представлен на рис. 4.7. Для зажигания дуги нужно слегка прикоснуться к изделию (1) и нажать на кнопку триггера; при этом начнет подаваться защитный газ и небольшой ток пойдет через электрод. Затем следует медленно наклонить горелку так, чтобы сопло коснулось изделия (2), и продолжить наклон, чтобы электрод оторвался от изделия; дуга зажигается (3). После этого надо приподнять горелку; ток поднимется до заданного уровня в течение заданного времени нарастания (4).

**Получение сварного шва.** После того как загорится дуга, нужно держать горелку перпендикулярно поверхности изделия и совершать небольшие круговые движения, пока не сформируется сварочная ванна. После того как сформируется сварочная ванна необходимого размера, следует наклонить горелку под углом  $75^\circ$  к поверхности изделия и начать медленно и равномерно перемещать ее вдоль сварного шва. Скорость перемещения выбирается такой, чтобы сварочная ванна все время оставалась яркой и жидкой. Никаких колебаний или других перемещений, кроме устойчивого движения вперед, производить не следует.

Затем переместить горелку на задний край сварочной ванны и добавить металл присадочной проволоки быстрым касанием проволокой внешнего края сварочной ванны. Присадочную проволоку нужно держать под углом  $15^\circ$  к поверхности детали.

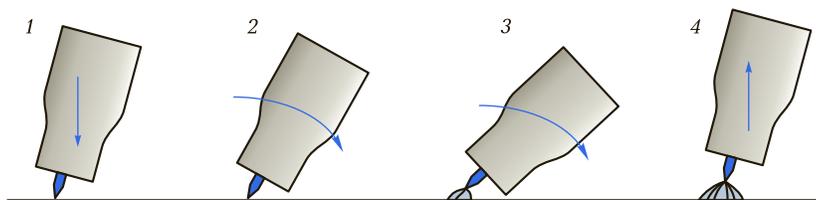


Рис. 4.7. Контактное зажигание дуги:

1...4 — последовательность действий

После этого нужно удалить присадочную проволоку и переместить дугу на внешний край сварочной ванны. Когда сварочная ванна вновь станет яркой и жидкой, следует повторить операцию по добавлению присадочного металла. Высота и ширина валика сварного шва зависит от скорости сварки (продольного поступательного движения), поперечного перемещения горелки и количества присадочного металла, вводимого в сварочную ванну.

В процессе сварки горячий конец присадочной проволоки не должен выходить из зоны охвата защитного газа. После прекращения сварки еще некоторое время в среде инертного газа должны находиться не только электрод и сварочная ванна, но и горячий конец присадочной проволоки.

**Сварка стыкового шва без разделки кромок в нижнем положении.** Сварку стыкового шва в нижнем положении производят по описанной методике (получение сварного шва). При выполнении сварки необходимо следить, чтобы дуга все время располагалась по линии стыка. Скорость сварки выбирают такой, чтобы получить нужную глубину проплавления. Заканчивая шов, чтобы заварить кратер, нужно уменьшить угол наклона горелки и дать больше присадочного металла.

**Сварка соединения внахлестку в нижнем положении.** Возбудив дугу, нужно сформировать сварочную ванну так, чтобы она перекрывала торец верхнего листа и поверхность нижнего листа, образуя равносторонний треугольник. Поскольку расплавленная поверхность края верхнего листа стремится стечь с образованием подреза, очень важно подобрать правильный угол наклона горелки. Присадочная проволока подается в передний край сварочной ванны через каждые 5...6 мм в количестве, достаточном для образования полнопрофильного шва. Заканчивать сварной шов, чтобы не было кратера, следует так же, как и в случае стыкового соединения.

**Сварка углового шва таврового соединения в нижнем положении.** При сварке следует учитывать, что боковая (вертикальная) поверхность нагревается сильнее и быстрее начинает плавиться. Угол наклона горелки должен быть таким, чтобы большая часть теплоты приходилась на горизонтальную поверхность. Для того чтобы держать короткую дугу и иметь возможность для провара корня шва, необходимо увеличить вылет электрода. Присадочную проволоку подают на край сварочной ванны в точку, где начинается плавление металла. Корректировка в процессе сварки угла наклона горелки и размещения присадочной проволоки помогает избежать подрезов. Кроме того, впадина сварочной ванны

во избежание вогнутости шва должна заполняться присадочной проволокой.

**Сварка углового соединения в нижнем положении и «в лодочку».** Выполнение шва «в лодочку» рассмотрим на примере сварки обратной стороны углового стыка в нижнем положении. Оба края примыкающих деталей должны плавиться, а сварочная ванна должна проходить по средней линии; присадочный металл добавляют в количестве, достаточном для получения выпуклого шва. При сварке тонких материалов можно обходиться без приемного материала, сплавляя кромки стыкуемых деталей.

В процессе сварки, независимо от типа соединения и его положения в пространстве, все внимание должно быть сконцентрировано на сварочной ванне. *Сварочная ванна* — это зона, в которой происходит расплавление и слияние металлов. Управление сварочной ванной и глубиной проплавления имеет первостепенное значение при сварке в любом пространственном положении.

Правила для выполнения качественного соединения в любом пространственном положении остаются теми же, что и при сварке в нижнем положении. Основные правила: чистота свариваемой поверхности, хорошая сборка под сварку, предварительный нагрев, если он требуется, достаточный поток защитного газа и правильно выбранный сварочный ток. Кроме того, при сварке (кроме нижнего положения) следует использовать большой сварочный ток и наплавлять большой валик сварного шва. Направлять дугу следует так, чтобы не допускать перегрева свариваемых деталей. Перегрев приводит к свисанию металла шва или прожогу. Формирование валика сварного шва и порядок действий по добавлению присадочного металла необходимо выполнять правильно, чтобы гарантировать полное слияние между порциями добавленного металла.

**Сварка в горизонтальном положении.** При сварке в горизонтальном положении зажигать дугу нужно на краю стыка. Затем следует спозиционировать горелку (наклон от горизонтали вниз —  $15^\circ$ , отклонение назад (от направления сварки) —  $15^\circ$ ). После того как сварочная ванна сформирована, нужно подвести сварочную проволоку на внешний край сварочной ванны к верху детали, затем переместить горелку по ходу сварки (рис. 4.8). Правильно выбранная длина дуги с соответствующей ей скоростью сварки предотвратит прожоги и сквозное плавление.

**Сварка в вертикальном положении.** При сварке в вертикальном положении снизу вверх сварка начинается внизу соединения с добавлением присадочного металла сверху. Необходимо попы-

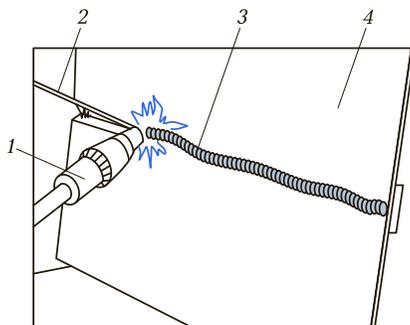


Рис. 4.8. Сварка в горизонтальном положении:  
 1 – горелка; 2 – присадочная проволока; 3 – шов;  
 4 – свариваемые детали

таться создать «полочку» и с каждым прикосновением сварочной проволокой поднимать ее выше и выше. Все время должна быть площадка для наложения следующей порции присадочного металла. Если сварной шов широкий, то создают «полочку» сначала с одной стороны шва, затем с другой и соединяют их перемычкой.

При сварке стыкового шва с разделкой кромок нужно увеличить вылет электрода, а торец сопла может опираться на край шва. Горелкой совершаются небольшие колебания вверх и вниз. Эта техника сварки способствует устойчивости руки, но затрудняет наблюдение за сварочной ванной.

При сварке сверху вниз используют поверхностное натяжение расплавленного металла и давление дуги, заставляющей держать расплавленный металл в сварочной ванне. Сварка сверху вниз в вертикальном положении применяется преимущественно для сварки тонкого металла. На рис. 4.9 показано положение горелки и присадочной проволоки при сварке в вертикальном положении.

**Сварка в потолочном положении.** Сварка в потолочном положении наиболее трудная. Как и при сварке в вертикальном положении, сила тяжести, заставляющая вытекать расплавленный металл из сварочной ванны, усложняет сварку.

В отличие от сварки снизу вверх в вертикальном положении, когда можно создать «полочку» и, постепенно ее наращивая, получать сварной шов, при сварке в потолочном положении приходится полагаться только на поверхностное натяжение расплавленного металла сварочной ванны, давление дуги и комбинацию уменьшения сварочного тока и скорости сварки.

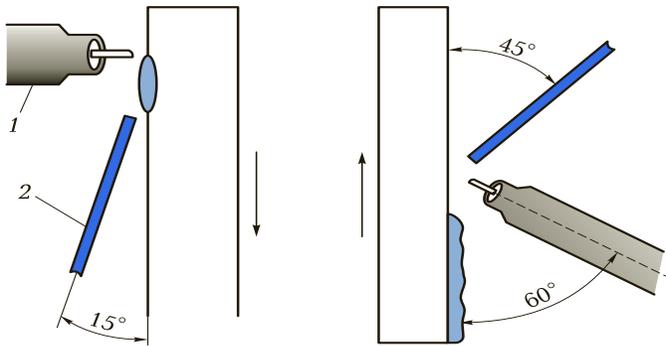


Рис. 4.9. Положение горелки 1 и присадочной проволоки 2 при сварке в вертикальном положении

При сварке стыковых швов без разделки кромок и угловых швов в потолочном положении можно увеличить вылет электрода и опираться торцом сопла горелки об одну или обе стороны стыка. В процессе сварки сварщик может опираться несколькими пальцами руки или всей рукой, держащей горелку или присадочную проволоку, на поверхность свариваемой детали, чтобы придать устойчивость руке.

Уровень тепловложения в сварочную ванну при сварке в потолочном положении чрезвычайно важен. Тепловложение в сварной шов должно быть меньше, чем при сварке в горизонтальном

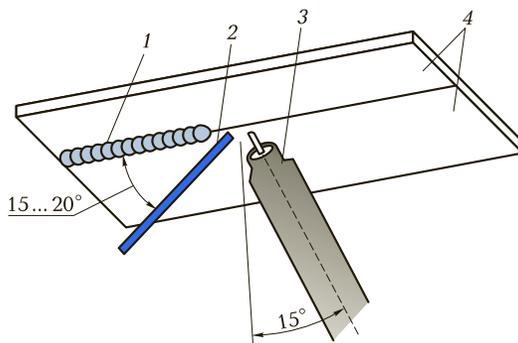


Рис. 4.10. Положение горелки и присадочной проволоки при сварке в вертикальном положении:

1 — шов; 2 — присадочная проволока; 3 — горелка; 4 — свариваемые детали

и нижнем положении, т.е. необходимо уменьшить сварочный ток на 5... 10 %. Это дает меньший размер сварочной ванны и тем самым предотвращает вытекание и падение из сварочной ванны расплавленного металла сварного шва. Кроме того, меньшая сварочная ванна является более управляемой.

Поток же защитного газа, наоборот, нужно увеличить. На рис. 4.10 показано положение горелки и присадочной проволоки при сварке в потолочном положении. Несомненно, сварка в потолочном положении очень трудна и утомительна для сварщика, поэтому процесс сварки медленный и долгий. Большинство неопытных сварщиков считают сварку в потолочном положении неудобной, поэтому при сварке в потолочном положении желательнее принять комфортную позу. Это поможет держать горелку устойчиво, ровно и манипулировать присадочной проволокой.

**Сварка труб.** Сварка неплавящимся вольфрамовым электродом дает самые высококачественные швы при сварке труб с минимальной деформацией. Сварка труб требует большого умения, и только сварщик, освоивший сварку стыковых швов во всех пространственных положениях, может качественно ее выполнить.

Поскольку в большинстве случаев сварка труб производится с зазором, необходимо защищать сварной шов. Это можно сделать концевой заглушкой, одеваемой на трубу, с подачей внутрь защитного газа, или просто закрыть торец трубы бумагой и уплотнить скотчем, но обязательно подать внутрь защитный газ.

Для сварки труб необходимо применять только вольфрамовые электроды с содержанием 1,5 % лантана или 2,0 % тора. Кроме того, коническая заточка электрода должна иметь притупление диаметром 0,5 мм. Эта небольшая плоская точка помогает равномерно распределить дугу на совмещаемых краях стыка.

Наиболее популярна техника сварки, когда сопло опирается на края сварного соединения. Эта техника использует специфический способ манипулирования горелкой с комбинацией чрезвычайно больших газовых сопел и позволяет хорошо сформировывать сварной шов при минимальной усталости сварщика. При сварке секций трубопровода между ними остается зазор, который должен быть меньше диаметра присадочной проволоки. Проволока должна опираться на кромки зазора, не проскальзывая внутрь.

Для корневого прохода опираются газовым соплом на обе кромки сварной шва, слегка поворачивая горелку от одной стороны к другой. После формирования сварочной ванны совершают небольшие медленные перемещения горелки вперед-назад, постепенно продвигаясь по ходу сварки.

Сварочная проволока не погружается периодически в сварочную ванну, а постоянно держится на ее переднем крае. Когда корневой проход завершен, на горелку устанавливается большее сопло так, чтобы сопло опиралось на кромки зазора и на поверхность шва корневого прохода. Во время сварки совершают небольшие медленные перемещения горелки вперед-назад, постепенно продвигаясь по ходу сварки. Сварочную проволоку держат на переднем крае сварочной ванны, не окуная ее в расплавленный металл. Третий и последующие проходы выполняются так же.

Методика сварки труб с опиранием сопла на кромки шва требует увеличенного вылета электрода, но электрод не должен касаться расплавленного металла сварочной ванны.

При окончании процесса сварки дугу следует обрывать понижением сварочного тока или постепенным ее удлинением.

**Сварка импульсной дугой.** При сварке вольфрамовым электродом дуга может гореть как при практически постоянной силе сварочного тока, так и при ее изменении по определенной программе. Данный способ применяется при сварке металла толщиной от долей миллиметров до 3... 4 мм. Использование тока, достаточно-

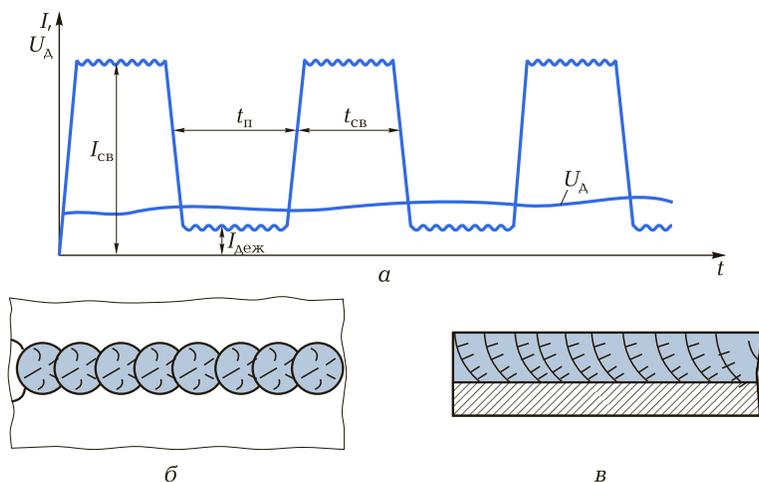


Рис. 4.1.1. Изменение силы тока и напряжения при импульсной аргонодуговой сварке (а) и форма шва в плоскости листа (б) и в продольном сечении (в):

$I_{св}$  — ток дуги в импульсе;  $I_{деж}$  — ток дуги в дежурном режиме (пауза);  $t_{св}$  — длительность импульса;  $t_{п}$  — длительность паузы;  $U_{д}$  — напряжение на дуге

го по значению для стабильного горения дуги и включаемого периодически, импульсами, с частотой до 25 импульсов в секунду, уменьшает размеры сварочной ванны (рис. 4.11). Шов образуется из отдельных расплавленных ванн. В перерыве между импульсами тока сварочная ванна частично кристаллизуется, снижая вероятность прожогов. Однако при больших перерывах между импульсами дуговой промежуток теряет носители зарядов (ионы); повторное возбуждение дуги затрудняется. Для уменьшения влияния данного фактора в паузах между импульсами поддерживается дежурная дуга с уменьшенным током. Регулируя соотношение между током основной дуги, током дежурной дуги, длительностью импульса и длительностью паузы, изменяют форму и размеры шва. Этот способ позволяет сваривать стыковые соединения «на весу» во всех пространственных положениях.

## 4.5. ТЕХНИКА ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Плазменная сварка является высокопроизводительным процессом, при котором в качестве источника теплоты используют плазменную струю — поток ионизированных частиц, обладающих большим запасом энергии. Температура плазменной струи достигает 20 000...30 000 °С.

От дугового способа сварки плазменная сварка отличается формой дуги. Дуга при сварке неплавящимся электродом в среде инертного газа имеет форму колокола. При плазменной сварке вследствие обжатия стенки сопла дуга принимает цилиндрическую форму (так называемая сжатая дуга) (рис. 4.12). Плазмообразующий газ подается в камеру горелки и, вытекая через сопло 3, сжимает дугу. Часть газа, проходя через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла 3 в виде плазменной струи. Наружный слой, омывающий столб дуги, остается относительно холодным и создает электрическую и тепловую изоляцию между дугой и соплом, предохраняя его от разрушения. При плазменной сварке дуга может быть двух видов: прямого и косвенного действия. Дуга, горящая между электродом 1 и деталью 5, называется дугой прямого действия, а дуга, горящая между электродом 1 и соплом 3, — дугой косвенного действия. Через газозащитное сопло (на рис. 4.12 не показано) осуществляется дополнительная защита зоны сварки инертным газом, которая необходима в связи с тем, что высокотемпературная струя истекает с большой скоростью и увлекает с со-

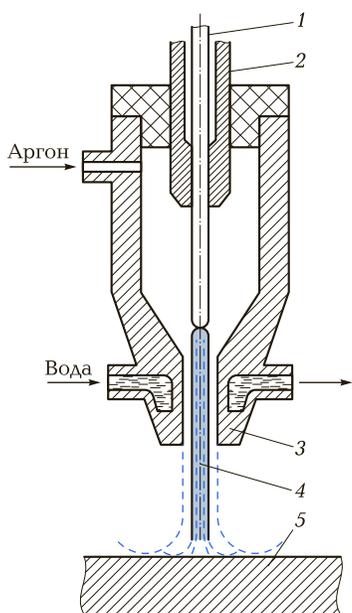


Рис. 4.12. Схема процесса плазменной сварки:

1 — вольфрамовый электрод; 2 — цанга; 3 — сопло; 4 — плазменная дуга; 5 — свариваемая деталь

бой в зону сварки окружающий воздух. В основном применяются горелки прямого действия.

**Микроплазменная сварка.** Для создания плазменной струи используют дуговой разряд значительной длины, возбуждаемый между стержневым электродом и плоским электродом с отверстием (соплом) в электрически нейтральном канале, через который пропускают газ (рис. 4.13).

Газ 2, проходя по каналу в направлении от стержневого электрода 1 к соплу 5 через плазму дуги 6, в результате соударения с электронами ионизируется. Из сопла выходит плазменная струя 4. Стенки канала 7 и сопла охлаждаются водой 3. Струя имеет ста-

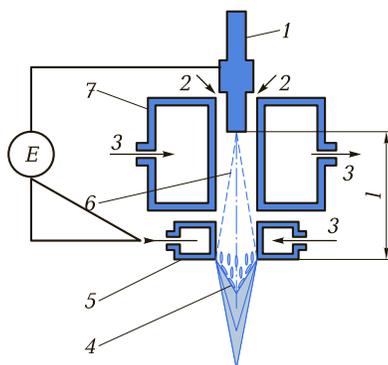


Рис. 4.13. Схема создания микроплазменной струи:

1 — электрод; 2 — газ; 3 — вода; 4 — плазменная струя; 5 — сопло; 6 — дуга; 7 — канал; E — напряженность электрического поля; l — длина дуги

бильную форму ярко светящегося конуса (ядра), окруженного светящимся факелом. Нагрев осуществляется в основном за счет непосредственной бомбардировки поверхности нагреваемого тела частицами струи.

Для сварки металла особо малых толщин, от десятков микрометров до 1 мм, мелких и мельчайших деталей успешно используется разновидность плазменной сварки, известная под названием «микроплазменная сварка» (или сварка игольчатой дугой), потому что здесь струя плазмы диаметром 1,5...2,0 мм заканчивается острием. Применяемая сила тока — 0,1...10,0 А, расход газа — 10...30 л/ч, диаметр сопла — 0,8 мм. Формирующий газ придает плазменной струе форму иглы.

Вспомогательная дуга зажигается замыканием контакта внутри горелки и горит постоянно. Можно работать дугой как прямого, так и косвенного действия; дуга устойчива и постоянна, легко зажигается при наличии постоянно горящей вспомогательной дуги. Дуга поддерживается длиной около 10...12 мм, и случайные колебания длины дуги около  $\pm 1$  мм не оказывают заметного влияния на качество сварки. Способ является эффективным для сварки очень тонких листов, проволок и т.п. Плазменный факел с острым игольчатым концом и нечувствительностью к колебаниям длины дуги до  $\pm 1$  мм повышает качество работы, а очертания швов делает точными и аккуратными. Микроплазменная сварка успешно используется при соединении фольги, проволок, изготовлении сифононов, при соединении проволочных сеток и т.п.

## 4.6. ТЕХНИКА СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах — это процесс соединения металлов плавлением электрической дугой, горящей между непрерывно подаваемым плавящимся электродом и деталью. Зона горения дуги защищается с помощью газа (рис. 4.14). Защитный газ и подвижный плавящийся электрод — две обязательные составляющие этого процесса.

При сварке плавящимся электродом шов образуется за счет проплавления основного металла и расплавления дополнительного металла — электродной проволоки. Форма и размеры шва помимо скорости сварки, пространственного положения электрода и детали зависят также от характера расплавления и переноса

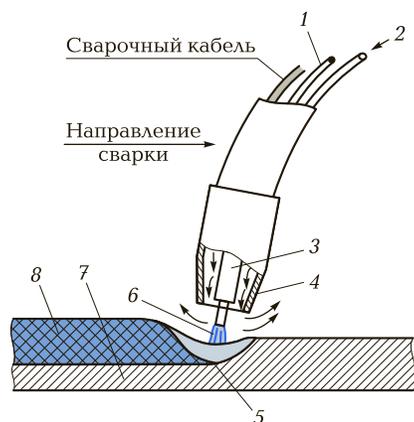


Рис. 4.14. Схема процесса сварки плавящимся электродом в защитном газе:

1 — электродная проволока; 2 — защитный газ; 3 — направляющая контактная трубка; 4 — газовое сопло; 5 — сварочная ванна; 6 — дуга; 7 — основного металла; 8 — металл шва

электродного металла в сварочную ванну. Характер переноса электродного металла определяется в основном материалом электрода, составом защитного газа, плотностью сварочного тока и рядом других факторов.

Характер переноса расплавленного металла имеет большое значение для качественного формирования сварного шва при сварке плавящимся электродом в защитном газе. Управляя этим процессом различными способами (используя специальные сварочные процессы), можно всегда получить качественное сварное соединение. При сварке плавящимся электродом в защитных газах можно выделить несколько основных форм расплавления электрода и переноса электродного металла в сварочную ванну:

- циклический режим сварки короткой дугой без разбрызгивания;
- режим сварки оптимизированной короткой дугой;
- крупнокапельный процесс сварки;
- режим импульсной сварки;
- режим струйного (Spray) переноса металла;
- режим непрерывного вращающегося переноса металла (ротационный перенос).

Режим струйного и крупнокапельного, а также непрерывного вращающегося переноса металла связан со сравнительно высокой энергией дуги и обычно ограничивается сваркой в нижнем и горизонтальном положении металла толщиной более 3 мм. Циклический режим сварки короткой дугой без разбрызгивания и импульсная сварка имеют низкие энергетические показатели, но обычно позволяют сваривать металл толщиной до 3 мм во всех пространственных положениях.

**Циклический режим сварки короткой дугой без разбрызгивания (процесс сварки с периодическими короткими замыканиями).** Данный процесс характерен для сварки электродными проволоками диаметром 0,5...1,6 мм при короткой дуге напряжением 15...22 В и силе тока 100...200 А. После очередного короткого замыкания (стадии 8 и 9 на рис. 4.15) силой поверхностного натяжения расплавленный металл на торце электрода стягивается в каплю, приближая ее к правильной сфере (стадии 1—3), создавая тем самым благоприятные условия для плавного объединения со сварочной ванной, в результате чего длина и напряжение дуги становятся максимальными.

На всех стадиях процесса скорость подачи электродной проволоки постоянна, а скорость ее плавления изменяется и в стадиях 3 и 4 меньше скорости подачи, поэтому торец электрода с каплей приближается к сварочной ванне (длина дуги и ее напряжение уменьшаются) до короткого замыкания (стадия 4). Во время короткого замыкания капля расплавленного электродного металла переходит в сварочную ванну, далее процесс повторяется.

При коротком замыкании резко возрастает сварочный ток — до 150...200 А и увеличивается сжимающее действие электромагнитных сил (стадии 6, 7), совместное действие которых разрывает перемычку жидкого металла между электродом и деталью. Капля мгновенно отрывается, обычно разрушаясь и разлетаясь в стороны, что приводит к разбрызгиванию. Кроме того, ток такой

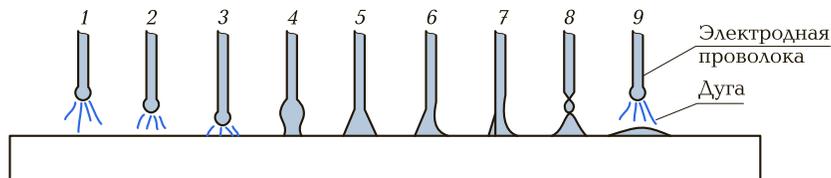


Рис. 4.15. Циклический режим сварки короткой дугой без разбрызгивания [1—9 — стадии процесса]

величины, пытаясь пройти через узкую перемычку, образовавшуюся между каплей и ванной, приводит к выплеску металла.

Для уменьшения разбрызгивания электродного металла необходимо сжимающее усилие, возникающее в проводнике при коротком замыкании, сделать более плавным. Это достигается введением в источник сварочного тока регулируемой индуктивности. Величина индуктивности определяет скорость нарастания сжимающего усилия. При малой индуктивности капля быстро и сильно сжимается и электрод начинает брызгать. При большой индуктивности увеличивается время отделения капли и она плавно переходит в сварочную ванну. Сварной шов получается более гладким и чистым. В табл. 4.7 приведено влияние индуктивности на характер сварки.

Частота периодических замыканий дугового промежутка при циклическом режиме сварки короткой дугой может изменяться в пределах 90...450 замыканий в секунду. Для каждого диаметра электродной проволоки в зависимости от материала, защитного газа и других факторов существует диапазон сварочных токов, в котором возможен процесс сварки с короткими замыканиями. Данный режим удобен для сварки тонколистового металла и пригоден для полуавтоматической сварки во всех пространственных положениях. При оптимальных параметрах процесса потери электродного металла на разбрызгивание не превышают 7%.

**Режим сварки оптимизированной короткой дугой.** Данный процесс сочетает в себе циклический режим сварки короткой дугой и очень высокую скорость подачи сварочной проволоки, что позволяет использовать короткую и мощную дугу (напряжение на дуге до 26 В при токе до 300 А). Данный режим позволяет получать и сваривать соединения с минимальным тепловложением и низкой степенью окисления металла шва.

**Таблица 4.7. Влияние индуктивности на характер сварки**

Минимальная индуктивность	Максимальная индуктивность
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Большая глубина проплавления.</li> <li>2. Более жидкая сварочная ванна.</li> <li>3. Гладкий сварной шов.</li> <li>4. Ровный валик сварного шва</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Используется только при сварке открытых участков устойчивой дугой.</li> <li>2. Более выпуклый валик сварного шва.</li> <li>3. Усиленное образование брызг.</li> <li>4. Более низкая температура сварочной дуги</li> </ol>

**Крупнокапельный процесс сварки.** Увеличение плотности сварочного тока (напряжения) дуги (напряжение на дуге — от 22 до 28 В; сила тока — от 200 до 290 А) способствует изменению характера расплавления и переноса электродного металла, переходу от сварки короткой дугой с короткими замыканиями к процессу с редкими короткими замыканиями или без них. В сварочную ванну электродный металл переносится нерегулярно, отдельными крупными каплями различного размера, хорошо заметными невооруженным глазом. При этом ухудшаются технологические свойства дуги, затрудняется сварка в потолочном положении, а потери электродного металла на угар и разбрызгивание возрастают до 15 %.

Крупнокапельный процесс сварки характеризуется некачественным формированием сварного шва.

При использовании инертных защитных газов достигается осеориентированный перенос электродного металла без разбрызгивания. Длина дуги при этом должна быть достаточной, чтобы гарантировать отделение капли прежде, чем она коснется расплавленного металла (рис. 4.16).

Использование углекислого газа в качестве защитного при крупнокапельном переносе всегда дает неосеориентированный перенос капель металла. Это является следствием электромагнитного отталкивающего воздействия на них расплавленных капель. При углекислотной защите конец электродной проволоки плавится теплотой дуги, переданной через расплавленную каплю. Капли в виде бесформенных шариков, произвольно направляемые через дугу, дают сильное разбрызгивание (рис. 4.17). Сварной шов получается грубый, с волнистой поверхностью.

**Режим импульсной сварки.** Для улучшения технологических свойств дуги варьируют периодическим изменением ее мгновен-

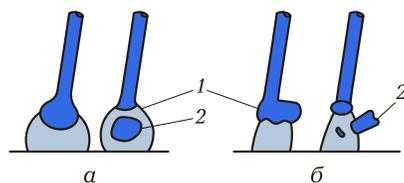


Рис. 4.16. Крупнокапельный перенос металла при сварке:

*а* — осеориентированный перенос электродного металла при сварке в инертных газах; *б* — неосеориентированный перенос каплей электродного металла при сварке в углекислом газе; 1 — дуга; 2 — капля электродного металла

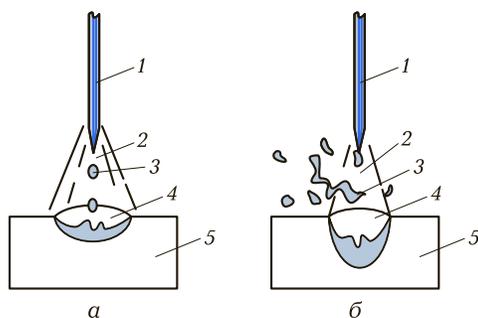


Рис. 4.17. Струйный (а) и крупнокапельный (б) перенос электродного металла:

- 1 — электродная проволока; 2 — дуга; 3 — капля металла;  
4 — сварочная ванна; 5 — основного металл

ной мощности — это импульсно-дуговая сварка. Теплота, выделяемая основной дугой, недостаточна для плавления электродной проволоки со скоростью, равной скорости ее подачи, вследствие чего длина дугового промежутка уменьшается.

Под действием импульса тока происходит ускоренное расплавление электрода, обеспечивающее формирование капли на его конце. Резкое увеличение электродинамических сил сужает шейку капли и сбрасывает ее в направлении сварочной ванны в любом пространственном положении, т.е. режим импульсной сварки — это режим, при котором капли расплавленного металла принудительно отделяются электрическими импульсами. За счет этого на токах, соответствующих крупнокапельному переносу, можно формировать качественные сварные швы подобно циклическому режиму сварки короткой дугой без разбрызгивания.

Импульсный режим использует одиночные импульсы или группу импульсов с одинаковыми или различными параметрами. В последнем случае первый или первые импульсы ускоряют расплавление электрода, а последующие сбрасывают каплю электродного металла в сварочную ванну. За счет этого металл переносится порциями мелких капель и без разбрызгивания. Кроме того, за счет применения импульсной технологии возникает вибрация сварочной ванны, в результате чего газовые пузырьки выходят из нее и сварные швы получают высокой плотности.

Устойчивость режима импульсной сварки зависит от соотношения основных параметров (величины и длительности импуль-

сов и пауз). Соответствующим подбором тока основной дуги и импульса можно повысить скорость расплавления электродной проволоки, изменить форму и размеры шва, а также уменьшить нижний предел сварочного тока, обеспечивающий устойчивое горение дуги.

Преимуществом этого метода является низкое тепловложение, что важно при сварке тонких материалов. Импульсный режим обеспечивает высококачественную сварку низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Импульсный режим обеспечивает более высокий коэффициент тепловложения в наплавленный металл, чем циклический режим сварки короткой дугой без разбрызгивания, и осуществляется при напряжении на дуге от 28 до 35 В и токах от 300 до 350 А. На рис. 4.18 показаны график изменения тока и процесс переноса металла.

**Режим струйного переноса металла.** При достаточно высоких плотностях постоянного по величине (без импульсов или с импульсами) сварочного тока обратной полярности и при горении дуги в инертных газах (содержание аргона — не менее 80 %) может наблюдаться очень мелкокапельный перенос электродного металла. Название «струйный» он получил потому, что при его наблюдении невооруженным глазом создается впечатление, что расплавленный металл стекает в сварочную ванну с торца электрода непрерывной струей.

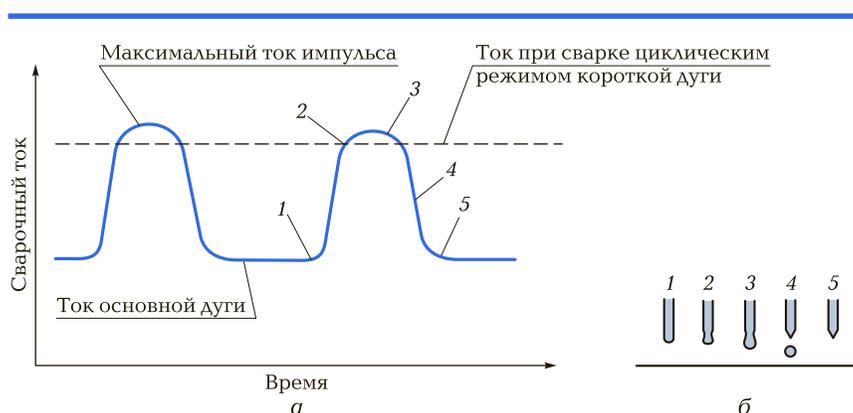


Рис. 4.18. Режим импульсной сварки:

а — график изменения сварочного тока во времени; б — процесс переноса металла; 1–5 — стадии формирования капли на электроде в зависимости от значения сварочного тока

Поток капель направлен строго по оси от электрода к сварочной ванне, дуга очень стабильная и ровная, разбрызгивание очень небольшое. Валик сварного шва имеет гладкую поверхность. Энергия дуги передается в металл в форме конуса, поэтому наплавляемый металл имеет поверхностное слияние. Глубина проплавления больше, чем при циклическом режиме сварки короткой дугой, но меньше, чем при крупнокапельном переносе.

При переходе к струйному переносу поток газов и металла от электрода в сторону сварочной ванны резко интенсифицируется благодаря сжимающему действию электромагнитных сил. В результате под дугой уменьшается прослойка жидкого металла, а в сварочной ванне появляется местное углубление. Повышается теплопередача к основному металлу, и шов приобретает форму с повышенной глубиной проплавления по его оси. При струйном переносе дуга очень стабильна — колебаний сварочного тока и напряжений не наблюдается.

Режим струйного переноса металла характеризуется узким столбом дуги и заостренным концом плавящейся электродной проволоки. Расплавленный металл проволоки передается через дугу в виде мелких капель — от сотен до нескольких сотен в секунду. Диаметр капель равен или меньше диаметра электрода. Поток капель осенаправленный. Скорость плавления проволоки — 42...340 мм/с.

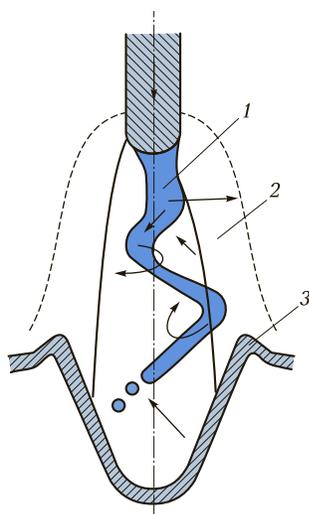
Струйный перенос металла происходит при дуге высокой стабильности (напряжение на дуге — 28...40 В при токе 290...450 А) и позволяет формировать качественные сварные швы при высоких значениях силы тока. Данный режим необходим для сварки металлов толщиной более 5 мм.

**Режим непрерывного вращающегося переноса металла (ротационный перенос).** Ротационный перенос металла возникает при образовании длинного столба жидкости на конце оплавающегося электрода. Вследствие очень большого тока (напряжение на дуге 40...50 В при токе 450...650 А) и значительного вылета электрода температура образующейся капли настолько высока, что электрод плавится уже без действия дуги. Расстояние до токоведущего мундштука в этом случае составляет 25...35 мм. Продольное магнитное поле заставляет столб жидкости вращаться вокруг своей оси и конически расширяться (рис. 4.19). Капли металла переходят в радиальном направлении в основной материал и создают относительно плоское и широкое проплавление.

Инертные газы — аргон, гелий — и их смеси обязательно используются для сварки цветных металлов, а также широко приме-

Рис. 4.19. Режим непрерывного вращающегося переноса металла:

1 — электродная проволока; 2 — дуга;  
3 — сварочная ванна



няются при сварке коррозионно-стойких и низколегированных сталей. Основное различие между аргоном и гелием — плотность, теплопроводность и характеристика дуги. Плотность аргона приблизительно в 1,4 раза больше плотности воздуха, а гелий в 0,14 раза легче воздуха. Для защиты сварочной ванны более эффективен тяжелый газ. Следовательно, гелиевая защита сварочной ванны для получения того же эффекта требует приблизительно в 2—3 раза большего расхода газа.

Гелий обладает большей теплопроводностью, чем аргон, и энергия в гелиевой дуге распределена более равномерно. Плазма аргоновой дуги характеризуется очень высокой энергией сердцевины и значительно меньшей для периферии. Это различие оказывает большое влияние на профиль сварного шва. Гелиевая дуга дает глубокий, широкий, параболический сварной шов. Аргоновая дуга чаще всего характеризуется сосковидной формой сварного шва (рис. 4.20).

При любой скорости подачи электродной проволоки напряжение на аргоновой дуге будет значительно меньше, чем на гелиевой дуге. В результате будет меньшее изменение напряжения по длине дуги, что, в свою очередь, приведет к большей стабилизации дуги. Аргоновая дуга (включая смеси как с низким, так и 80%-ным содержанием аргона) производит струйную передачу электродного металла.

Гелиевая дуга производит крупнокапельный перенос металла в нормальном рабочем диапазоне. Следовательно, гелиевая дуга имеет большую степень разбрызгивания электродного металла и меньшую глубину проплавления. Легко ионизируемый аргон облегчает зажигание дуги и при сварке на обратной полярности («плюс» на электроде) дает очень чистую поверхность сварного шва.

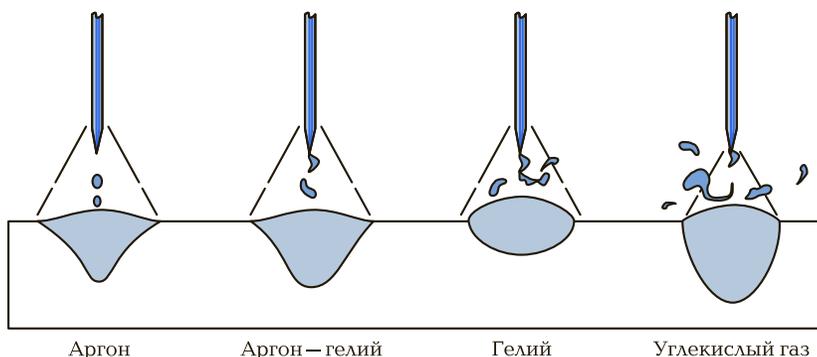


Рис. 4.20. Форма сварного шва и глубина проплавления при сварке в среде различных защитных газов

В большинстве случаев чистый аргон используется при сварке цветных металлов. Использование чистого гелия ограничено из-за нестабильной устойчивости дуги. Тем не менее желаемый профиль сварного шва (глубокий, широкий, параболической формы), получаемый с гелиевой дугой, можно получить, применяя смесь аргона с гелием. Кроме того, характер переноса электродного металла приобретает характер, как при аргоновой дуге.

Смесь гелия с аргоном при 60...90%-ном содержании гелия используется для получения максимального тепловложения в основной металл и улучшения сплавления. Для некоторых металлов, например коррозионно-стойкой и низколегированной стали, замена углекислого газа на гелий позволяет увеличить тепловложение, а поскольку гелий — инертный газ, изменения свойств свариваемого металла не происходит.

Чистый аргон и гелиевая защита дают отличные результаты при сварке цветных металлов. Тем не менее эти газы в чистом виде дают не вполне удовлетворительную характеристику при сварке черных металлов. Гелиевая дуга стремится к переходу в неуправляемый режим, сопровождаемый сильным разбрызгиванием. Аргоновая дуга имеет тенденцию к прожогу. Добавление к аргону 5 % кислорода или 3...10 % (до 25 %) углекислого газа дает заметное улучшение характеристики.

Добавление углекислого газа к аргону позволяет получить грушевидный профиль сварного шва. Применение различных газов и газовых смесей для различных металлов и на различных режимах приведено в табл. 4.8, 4.9.

Как и любой тип дуговой сварки, процесс сварки плавящимся электродом в защитных газах начинается с зажигания дуги. Для легкого зажигания дуги электрод (электродная проволока) должен

**Таблица 4.8. Выбор защитных газов и газовых смесей для циклического режима сварки короткой дугой без разбрызгивания**

Свариваемый металл	Защитный газ	Применение
Углеродистая сталь	75 % аргона + 25 % углекислого газа	Высокая скорость сварки без прожога металла толщиной до 3 мм, минимальные деформация и образование брызг
	75 % аргона + 25 % углекислого газа	Минимальное образование брызг при сварке металла толщиной более 3 мм, гладкий сварной шов, хорошее управление сварочной ванной в вертикальном и потолочном положениях
	Углекислый газ	Глубокое проплавление, высокая скорость сварки
Коррозионно-стойкая сталь	90 % гелия + 7,5 % аргона + 2,5 % углекислого газа	Отсутствие оксидирования расплавленного металла, узкая околошовная зона, отсутствие прожога, минимальные деформации деталей
Низколегированная сталь	60... 70 % гелия + + 25... 35 % аргона + + 4... 5 % углекислого газа	Минимальная реакционная способность, высокая ударная вязкость, высокая стабильность дуги, хорошее формирование шва, небольшое количество брызг по контуру сварного шва
	75 % аргона + 25 % углекислого газа	Достаточная прочность, высокая устойчивость дуги, небольшое количество брызг по контуру сварного шва

Свариваемый металл	Защитный газ	Применение
Алюминий и алюминий-евые сплавы, медь и медные сплавы, никель и никелевые сплавы, магниевые сплавы	Аргон или аргон + гелий	Аргон удовлетворительно подходит для сварки листового металла; аргон с гелием предпочтительны для сварки металла толщиной более 3 мм

**Таблица 4.9. Выбор защитных газов и газовых смесей для струйного переноса электродного металла**

Свариваемый металл	Защитный газ	Применение
Алюминий и алюминий-евые сплавы	Аргон	Высокая стабильность дуги и хорошая передача электродного металла при сварке деталей толщиной до 25 мм
	35 % аргона + 65 % гелия	Большее тепловложение, чем при сварке в чистом аргоне, улучшенное формирование шва; применяется при сварке деталей толщиной 25 ... 75 мм
	25 % аргона + 75 % гелия	Максимальное тепловложение, минимальная пористость; применяется при сварке деталей толщиной более 75 мм
Магниевые сплавы	Аргон	Высокое качество шва
Углеродистая сталь	Аргон + 1 ... 5 % кислорода	Улучшенная стабильность дуги, более жидкая сварочная ванна, плавный переход от валика шва к основному металлу, минимальные прожоги; скорость сварки выше, чем при сварке в чистом аргоне

Свариваемый металл	Защитный газ	Применение
Углеродистая сталь	Аргон + 3... 10 % углекислого газа	Хорошая форма валика сварного шва, минимальное образование брызг, сварка только с позиционированием электрода
Низколегированная сталь	Аргон + 2 % кислорода	Минимальная вероятность прожога, высокая прочность сварных соединений
Коррозионно-стойкая сталь	Аргон + 1 % кислорода	Высокая стабильность дуги, более жидкая сварочная ванна, хорошее формирование профиля сварного шва, минимальная вероятность образования прожога
	Аргон + 2 % кислорода	Более высокая устойчивость дуги и скорость сварки, чем при содержании 1 % кислорода; применяется для сварки тонких деталей
Медь, никель и их сплавы	Аргон	Хорошее формирование шва, меньшая жидкотекучесть металла сварочной ванны; применяется для сварки деталей толщиной до 3 мм
	Аргон + 50... 75 % гелия	Повышенное тепловложение
Титан	Аргон	Высокая стабильность дуги, минимальное загрязнение металла сварного шва включениями; не требуется защита обратной стороны шва инертным газом

получить хороший контакт со свариваемой поверхностью. Для этого на свариваемой поверхности не должно быть масла, грязи, окалины и прочих веществ, затрудняющих контакт. Вылет провода следует установить согласно рис. 4.21, поскольку при увеличении вылета электрода трудно инициализировать дугу. Угол наклона горелки должен составлять 5...20°.

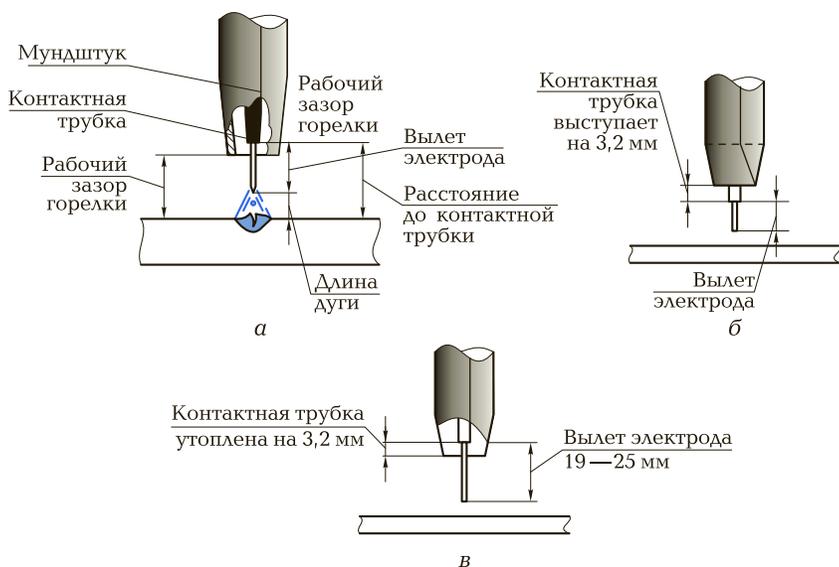


Рис. 4.21. Вылет электродной проволоки из мундштука сварочной горелки (а), расположение контактной трубки в сопле горелки при циклическом режиме сварки короткой дугой (б) и струйном переносе металла (в)

В целях компенсации подающего рукава и сварочного кабеля (при раздельном подводе) и для облегчения манипулирования горелкой необходимо перебросить их через плечо, затем выполнить следующие действия: поднести горелку к заготовке, не касаясь ее; опустить сварочную маску и нажать кнопку триггера. Нажатие на кнопку триггера включает сварочную цепь и подачу защитного газа. Двигатель подачи электродной проволоки не включается, пока электрод не войдет в контакт с деталью. Затем нужно переместить горелку по отношению к детали, касаясь проволочным электродом поверхности, как бы царапая ее. Чтобы предотвратить прилипание проволоки, необходимо быстро протянуть горелку на 10... 15 мм в направлении, противоположном направлению сварки, и приподнять ее. Как только появится контакт проволоки с изделием, начинает работать электродвигатель механизма подачи проволоки и работает до тех пор, пока нажата кнопка триггера.

Чтобы погасить дугу, необходимо отпустить кнопку триггера. Это отключит сварочную цепь, двигатель подачи электродной проволоки остановится. Если при сварке произошло прилипание

электрода, то необходимо отпустить кнопку триггера и бокорезами откусить проволоку.

При сварке в защитном газе плавящимся электродом большое значение имеет положение горелки по отношению к свариваемой детали. Если свариваемые детали равны по толщине, то поперечный угол между деталями должен быть одинаковым. Если детали не равны по толщине, то горелка наклоняется в сторону тонкого металла (поперечный угол уменьшается). Продольный угол в зависимости от характера переноса электродного металла должен находиться в пределах  $5...25^\circ$ .

Сварка может производиться как углом вперед, так и углом назад. Сварка углом назад означает, что горелка позиционируется так, что направление подачи электродной проволоки противоположно направлению перемещения горелки. Сварка углом вперед означает, что направление подачи электродной проволоки совпадает с направлением движения горелки. Следует отметить, что для изменения способа сварки не нужно изменять направление перемещения горелки, достаточно изменить ее наклон в продольном направлении.

Скорость перемещения сварочной горелки определяет скорость сварки, которая выражается в метрах в минуту. На скорость сварки влияют следующие факторы:

- толщина свариваемого изделия (с увеличением толщины металла уменьшается скорость сварки, и наоборот);
- скорость подачи электродной проволоки (с увеличением скорости подачи увеличивается скорость сварки);
- направление сварки (при сварке углом вперед скорость сварки выше).

При сварке углом назад достигается бóльшая стабильность дуги и меньшее брызгообразование. Сварка углом назад применяется для соединения толстого металла; при этом достигается большая глубина проплавления. Кроме того, сварщик видит сварочную ванну, что позволяет повысить качество сварки. Сварка углом вперед применяется для соединения тонкого металла. При этом достигается меньшая глубина провара, но сварка производится с большей скоростью.

Легче всего производить сварку в нижнем положении, причем качество сварного соединения получается наилучшее. В нижнем положении лучше растекание наплавленного металла и газовая защита. Освоив сварку в нижнем положении, можно производить ее и в других пространственных положениях. Сварка в горизон-

тальном, вертикальном снизу вверх и вертикальном сверху вниз положениях производится при уменьшенном на 10 % сварочном токе. На рис. 4.22 показан угол наклона сварочной горелки при сварке в различных пространственных положениях, а на рис. 4.23 — порядок наложения валиков при выполнении многопроходного сварного шва.

Поперечный угол наклона сварочной горелки при сварке угловых швов должен составлять  $45^\circ$ . Для стыковых швов поперечный наклон горелки должен составлять всего несколько градусов, иначе ухудшается расплавление металла на боковой поверхности стыка и соответственно ухудшается слияние металла шва и основного металла.

Сварка в вертикальном положении может осуществляться как снизу вверх, так и сверху вниз; при этом важное значение имеет положение горелки. Сварка должна производиться только в положении, обеспечивающем полное проплавление металла. Дуга должна располагаться на переднем краю сварочной ванны.

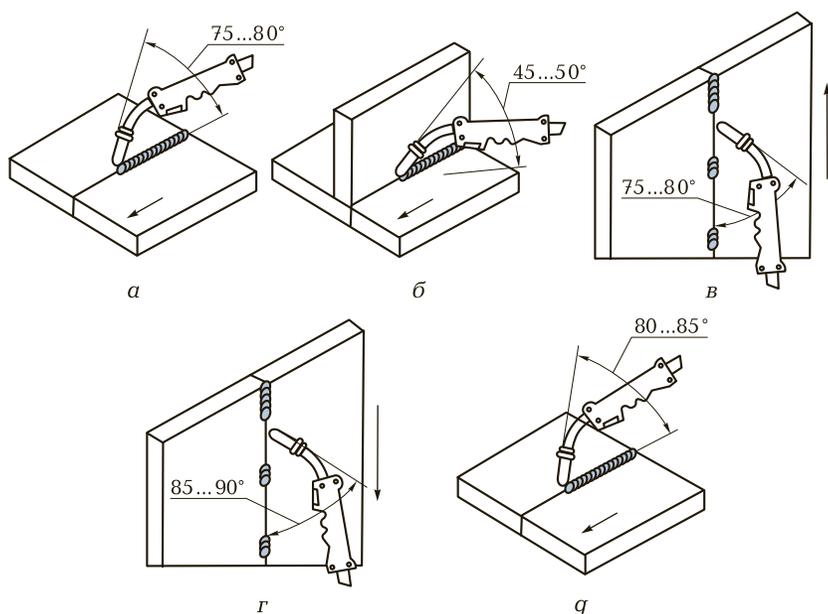


Рис. 4.22. Угол наклона сварочной горелки при выполнении различных швов в нижнем и вертикальном положениях при циклическом режиме сварки короткой дугой (а–г) и при струйном переносе металла (д)

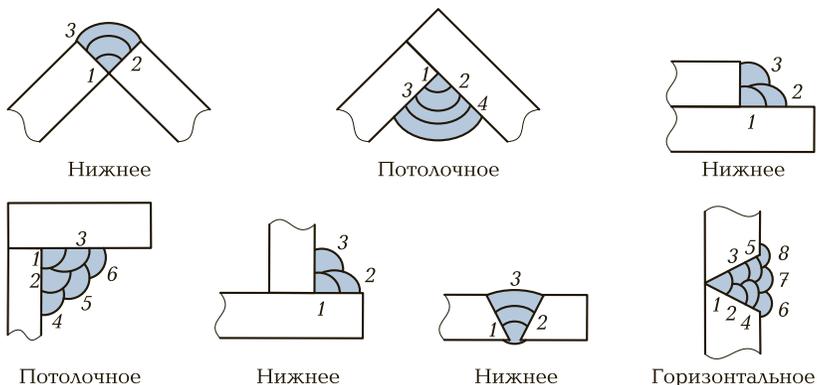


Рис. 4.23. Порядок наложения валиков [1–8] при выполнении многопроходного шва в нижнем, потолочном и горизонтальном положениях

**Проплавление.** *Проплавление* — это глубина сплавления основного металла. Значение сварочного тока является основным параметром, влияющим на глубину проплавления. Увеличение или уменьшение тока вызывает соответственно увеличение или уменьшение глубины проплавления. Глубину проплавления можно также увеличивать, увеличивая скорость подачи электродной проволоки при той же скорости перемещения горелки. При этом уменьшается длина дуги и соответственно увеличивается сварочный ток, т.е., изменяя скорость подачи проволоки, можно изменять глубину проплавления.

Изменение скорости перемещения сварочной горелки (т.е. изменение скорости сварки) похоже на изменение напряжения дуги — глубина проплавления максимальна при определенной скорости сварки и уменьшается как при ее снижении, так и при ее повышении. При низких скоростях большое количество расплавленного металла сварного шва создает «подушку» между дугой и основным металлом, что препятствует дальнейшему проплавлению. При больших скоростях сварки теплота, создаваемая дугой, не успевает достаточно глубоко проплавить основной металл. Изменение наклона сварочной горелки в меньшей степени, чем изменение напряжения и скорости сварки, влияет на глубину проплавления. Максимальное проплавление достигается при продольном угле наклона  $25^\circ$  и сварке углом назад. При наклоне на больший угол ухудшается стабильность дуги и увеличивается разбрызгивание расплавленного металла.

**Размер валика сварного шва.** Валик сварного шва характеризуется высотой (выпуклостью) и шириной. Правильность этих характеристик гарантирует, что валик сварного шва выполняется с минимумом дефектов, особенно при многопроходной сварке. В случае большой выпуклости шва при многопроходной сварке трудно наложить последующий шов, обеспечивая качественное слияние. Очень зауженный шов не обеспечивает хорошего слияния металла шва и основного металла.

Характеристика валика сварного шва зависит от его размера и формы. Для изменения размера сварного шва (количество наплавленного металла на погонный метр шва) необходимо изменить режим сварки. Основное влияние на размер сварного шва оказывают величина сварочного тока и скорость перемещения сварочной горелки. Размер сварного шва прямо пропорционален сварочному току и обратно пропорционален скорости перемещения горелки.

Изменение сварочного тока и скорости перемещения горелки, хотя и изменяет размер сварного шва, мало влияет на его форму. Изменяя напряжение на дуге (изменяя длину дуги), можно изменить форму сварного шва. Увеличение длины дуги вызывает увеличение ширины шва и уменьшение его высоты, причем объем шва (количество наплавленного металла на единицу длины) остается неизменным. Увеличивается ширина сварного шва, выпуклость уменьшается и более жидкий металл сварного шва эффективнее соединяется с основным металлом, т. е. улучшается слияние.

Увеличение длины дуги для повышения производительности сварки (скорости наплавки) вызывает увеличение выпуклости в большей степени, чем увеличение ширины шва; валик сварного шва становится чрезмерно выпуклым. Сварка углом назад также дает узкий и высокий валик сварного шва. Уменьшая угол продольного наклона горелки, можно уменьшить высоту валика сварного шва и увеличить его ширину. Сварка углом вперед дает более плоский и более широкий валик сварного шва.

**Манипулирование сварочной горелкой.** Описание технологии сварки без описания приемов манипулирования сварочной горелкой будет далеко не полным. Приведенные далее рекомендации являются справочными. Каждый сварщик по мере повышения квалификации вырабатывает свои приемы перемещения горелки.

*Сварка в нижнем положении.* При выполнении однопроходного шва совершаются пилообразные, с легким сдвигом назад, перемещения горелки. В многопроходном сварном шве с раздел-

кой кромок при выполнении корневого шва совершают зигзагообразные колебания горелки; при этом нужно следить, чтобы не было прожогов. Заполняющие и облицовочный швы выполняют с такими же колебаниями, но более широкими. Отличие заключается в том, что при выполнении этих швов производят поперечный наклон горелки и при достижении крайнего положения делают задержку горелки, что способствует лучшему сплавлению.

Угловой шов в нижнем положении выполняют, совершая сварочной горелкой круговые движения.

*Сварка в горизонтальном положении.* Стыковой шов в горизонтальном положении выполняется с использованием той же технологии перемещения сварочной горелки, что и при выполнении стыкового шва в нижнем положении. Отличие заключается в том, что заполняющие валики при сварке в горизонтальном положении более узкие. При выполнении сварки не следует забывать, что наклон горелки составляет  $90^\circ$  по отношению к поверхности, на которую накладывается валик сварного шва.

*Сварка в вертикальном положении.* Сварку однопроходного стыкового шва без разделки кромок в положении снизу вверх производят, совершая пилообразные колебания горелки. Корневой шов при многопроходной сварке выполняют, совершая зигзагообразные перемещения сварочной горелки. Заполняющие валики и облицовочный шов выполняют при ступенчатом перемещении горелки, причем при достижении крайней точки при горизонтальном перемещении необходимо сделать задержку и спуститься вниз на величину, равную диаметру электродной проволоки, а затем подняться вверх и переместиться по горизонтали на противоположную сторону. Там снова нужно сделать задержку и опуститься вниз и т.д.

Сварка углового шва в вертикальном положении снизу вверх производится движением горелки, как бы рисуя елочку, с задержкой на боковых поверхностях детали.

Стыковой сварной шов с разделкой кромок при сварке сверху вниз — корневой, заполняющий и облицовочный швы выполняют, совершая зигзагообразные перемещения сварочной горелки с задержкой в крайних точках. Поперечный наклон горелки составляет  $90^\circ$  к поверхности сварки. Производя манипулирование горелкой, нужно следить, чтобы дуга располагалась на переднем крае сварочной ванны. Нельзя допускать «прогона» расплавленного металла впереди дуги, так как это ухудшает качество сварки.

**Таблица 4.10. Режимы сварки в углекислом газе стыковых соединений низкоуглеродистых сталей в нижнем положении (постоянный ток, обратная полярность)**

Толщина металла, мм	Число проходов	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин
0,8... 1,0	1	0,7... 0,8	50... 80	17... 18	25... 50	8... 10	6... 7
1,5... 2,0	1	0,8... 1,2	90... 200	18... 22	25... 55	8... 13	6... 7
2,0	1	1,0... 1,2	180... 250	22... 23	25... 75	10... 13	7... 9
3,0	1	1,2... 1,4	200... 300	23... 25	25... 110	12... 15	8... 11
4,0	2	1,2... 1,6	200... 350	23... 32	25... 120	12... 20	8... 12
6,0	2	1,2... 2,0	250... 420	25... 36	25... 70	12... 20	10... 16
8,0	2	1,2... 2,5	300... 450	28... 38	20... 60	12... 25	11... 16
10,0	2	1,2... 2,5	320... 450	29... 38	20... 45	12... 25	12... 16
14,0	2	1,2... 2,5	380... 500	33... 40	15... 25	15... 25	12... 16

В табл. 4.10 приведены режимы сварки стыковых соединений низкоуглеродистых сталей различной толщины.

*Сварка в потолочном положении.* При выполнении стыкового шва с разделкой кромок в потолочном положении необходимо совершать зигзагообразное перемещение сварочной горелки. Поперечный наклон горелки составляет  $90^\circ$  к поверхности сварки. В крайних точках перемещения необходимо сделать небольшую задержку. Все сказанное ранее применимо при выполнении как корневого, так и заполняющего и облицовочного швов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы достоинства дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом?
2. Какие двойные и тройные смеси защитных газов на основе аргона применяются при сварке?
3. Чем отличается процесс сварки длинной дугой от сварки короткой дугой?

4. Какие типы переноса электродного металла существуют при сварке плавящимся электродом?
5. Назовите основные параметры режима сварки в углекислом газе.
6. Какие факторы влияют на выбор величины сварочного тока?
7. От чего зависит глубина проплавления?
8. Как влияет на формирование шва увеличение и снижение напряжения дуги?
9. Назовите особенности процесса дуговой сварки в защитных газах неплавящимся электродом.
10. Какие вольфрамовые электроды применяются для сварки?
11. Каким образом достигается сжатие сварочной дуги?
12. Какие параметры сварочной дуги изменяются при ее сжатии?
13. В каких случаях используется микроплазменная сварка?

# ТЕХНОЛОГИЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## 5.1. СВАРКА СТАЛЕЙ

Стаями называют сплавы железа с углеродом, содержащие менее 2 % углерода. По химическому составу различают углеродистые и легированные стали. Содержание углерода в конструкционных углеродистых сталях составляет 0,06...0,90 %. Углерод является основным легирующим элементом сталей этой группы и определяет их механические свойства и свариваемость. В низкоуглеродистых конструкционных сталях содержание элементов составляет, не более: 0,25 % — С; 0,80 % — Мп; 0,35 % — Si; 0,04 % — Р; 0,05 % — S. Кроме того, в них имеется некоторое количество остаточного водорода и азота.

Низколегированные стали высокой прочности (16Г2АФ, 14Х2ГМР) имеют предел текучести соответственно 450 и 600 МПа. Их высокие механические характеристики обусловлены использованием в качестве легирующих элементов ванадия и азота (сталь 16Г2АФ), а также бора (сталь 14Х2ГМР). Наиболее нежелательный дефект сварных соединений этих сталей — холодные трещины, образование которых связано с мартенситным превращением и наличием растворенного в металле водорода. При сварке низколегированных сталей для ограничения роста зерна следует уменьшать скорость охлаждения металла шва в околошовной зоне; количество водорода, растворенного в металле; погонную энергию сварки.

К легированным и углеродистым закаливающимся сталям относятся стали с суммарным содержанием легирующих элементов до 10 %. Легирование этих сталей многокомпонентное, комплексное; основные легирующие добавки — хром, марганец, кремний, никель, титан и др.

Для ответственных конструкций используют легированные стали перлитного класса средней прочности с временным сопротивлением разрыву  $\sigma_b = 900 \dots 1\,300$  МПа. Это стали 25ХГСА,

30ХГСА и другие с меньшим или большим содержанием углерода, а также сложнoleгированные стали с низким содержанием углерода, например 12Х2НВФА и 23Х2НВФА. Они отличаются лучшей свариваемостью по сравнению с высокопрочными легированными сталями типа 30ХГСН2А, 28ХЗСНВФА и 30Х2ГСНВМ.

Высоколегированными сталями считаются сплавы с суммарным содержанием легирующих элементов свыше 10 % при содержании в них железа более 45 %. В соответствии с содержанием основных легирующих элементов стали подразделяются на хромистые, хромоникелевые и т.д.

*Хромистые стали* имеют различную структуру в зависимости от содержания хрома и углерода. При содержании в них 12...13 % хрома и более 0,08 % углерода сталь относят к мартенситному классу, при содержании 13...16 % хрома — к мартенситно-ферритному классу, а более 16 % хрома — к ферритному классу.

*Хромоникелевые стали* классифицируются по типу структуры, составу легирующих элементов, свойствам и назначению. В зависимости от состава выделяют хромомарганцевые, хромоникельмолибденовые и хромоникельмарганцевые стали. В соответствии со структурой, получаемой при охлаждении на воздухе, различают следующие классы сталей: аустенитно-мартенситные, аустенитно-ферритные и аустенитные.

**Сварка углеродистых и низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей.** *Ручная дуговая сварка покрытыми электродами.* В зависимости от назначения конструкций и типа стали электроды можно выбирать согласно табл. 5.1. Режим сварки выбирают, руководствуясь толщиной металла, типом сварного соединения и пространственным положением сварки.

При сварке корневых швов в разделке на металле толщиной 10 мм и более используют электроды диаметром 3...4 мм. Рекомендуемые для данной марки электрода значения сварочного тока, его род и полярность выбирают согласно паспорту электрода, в котором обычно приведены его сварочно-технологические свойства, типичный химический состав шва и механические свойства. Рядовые и ответственные конструкции из низкоуглеродистых сталей сваривают электродами типа Э42 и Э46 (табл. 5.1, 5.2).

При сварке этих сталей обычно обеспечиваются достаточно высокие механические свойства сварного соединения, поэтому в большинстве случаев не требуются специальные меры, направленные на предотвращение образования в нем закалочных структур. Однако при сварке угловых швов на толстом металле и первого слоя многослойного шва для повышения стойкости металла

**Таблица 5.1. Марки электродов, применяемые при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей**

Назначение электродов	Марки электродов	Примечание
Сварка низкоуглеродистых сталей	ОММ-5, АНО-3, АНО-4, АНО-5, АНО-6, ЦМ-7, ОЗС-4, ОЗС-6, ОЗС-12, СМ-5	—
Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей	АНО-1, ВСП-1, ВСЦ-2, УОНИ-13/45, ОЗС-2, ОМА-2, МР-3	Электрод — АНО-1 для низкоуглеродистых сталей и стали 09Г2
Сварка ответственных конструкций из низко- и среднеуглеродистых и низколегированных сталей	ОМА-2, УОНИ-13/55, АН-7, ВСН-3, К-5А, ДСК-50, ОЗС-18, ОЗС-25, ОЗС-33	Электроды: УОНИ-13/55 для низкоуглеродистых сталей и стали 14ХГС; ВСН-3 для трубопроводов из стали 10Г2

к кристаллизационным трещинам может потребоваться его предварительный подогрев до температуры 120... 150 °С.

Для сварки рядовых конструкций из низколегированных сталей обычно применяют электроды типа Э42А и Э46А, а ответ-

**Таблица 5.2. Соответствие марок электродов их типу**

Тип электрода по ГОСТ 9467—75	Марки электродов
Э42	ОММ-5, СМ-5, ЦМ-7, АНО-1, АНО-5, АНО-6, ОМА-2, ОЗС-23
Э42А	УОНИ-13/45, СМ-11, ОЗС-2
Э46	АНО-3, АНО-4, МР-1, МР-3, ОЗС-3, ОЗС-4, ОЗС-6, ОЗС-12, ЭРС-1, ЭРС-2, РБУ-4, РБУ-5
Э46А	Э-138/45Н, УОНИ-13/55К
Э50	ВСН-3
Э50А	УОНИ-13/55, ДСК-50, К-5А, ОЗС-18, ОЗС-25, ОЗС-33

ственных конструкций — типа Э50А. Это обеспечивает получение металла шва с достаточной стойкостью к кристаллизационным трещинам и требуемыми прочностными и пластическими свойствами. Легирование металла шва за счет протравки основного металла легирующими элементами, входящими в основной металл, и повышенные скорости охлаждения позволяют получить металл шва с более высокими, чем при сварке низкоуглеродистых сталей, прочностными показателями.

Техника заполнения шва и определяемый ею термический цикл сварки зависят от предварительной термообработки стали. Сварка толстого металла способами «каскад» и «горка» замедляют скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны, предупреждая образование в них закалочных структур. Этот же эффект достигается при предварительном подогреве детали до температуры 150...200 °С. Эти способы дают благоприятные результаты на нетермоупрочненных сталях. При сварке термоупрочненных сталей для уменьшения разупрочнения стали в околошовной зоне рекомендуется сварка длинными швами по охлажденным предыдущим швам.

Следует выбирать режимы сварки с малой погонной энергией; при этом достигается и уменьшение протяженности зоны разупрочненного металла в околошовной зоне. При исправлении дефектов в сварных швах низколегированных и низкоуглеродистых сталей повышенной толщины швами малого сечения вследствие значительной скорости охлаждения металл подварочного шва и его околошовной зоны обладает пониженными пластическими свойствами, поэтому дефектные участки следует подваривать швами нормального сечения длиной не менее 100 мм или предварительно подогревать до температуры 150...200 °С.

*Сварка в защитных газах.* При сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей для защиты расплавленного электродного металла и металла сварочной ванны широко используют углекислый газ. Состав защитного газа существенно влияет на технологические характеристики процесса и состав металла шва. Помимо углекислого газа используют смеси газов:  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2 + \text{Ar} + \text{O}_2$ . Количество добавленных газов может достигать 50 % объема газовой смеси. Добавки кислорода, увеличивая окисляющее действие газовой среды на расплавленный металл, позволяют уменьшать концентрацию легирующих элементов в металле шва. Это иногда необходимо при сварке низколегированных сталей. Кроме того, немного уменьшается разбрызгивание расплавленного металла и повышается его жидкотекучесть.

Связывая водород, кислород уменьшает его влияние на образование пор.

Добавки в углекислый газ аргона (иногда в эту смесь вводят кислород) изменяют технологические свойства дуги (глубину проплавления и форму шва, стабильность дуги и др.) и позволяют регулировать концентрацию легирующих элементов в металле шва.

Аргон и гелий в «чистом» виде в качестве защитных газов находят ограниченное применение — только при сварке конструкций ответственного назначения.

Сварку в углекислом газе и его смесях выполняют плавящимся электродом. В некоторых случаях для сварки в углекислом газе используют неплавящийся угольный или графитовый электрод, однако этот способ применяется ограниченно, например при сварке бортовых соединений низкоуглеродистых сталей толщиной 0,3...2,0 мм (канистр, корпусов конденсаторов и т.д.). Так как сварка выполняется без присадки, содержание кремния и марганца в металле шва невелико. В результате прочность соединения обычно составляет 50...70 % прочности основного металла.

При полуавтоматической сварке плавящимся электродом швов, расположенных в различных пространственных положениях, обычно используют электродную проволоку диаметром до 1,2 мм; при сварке в нижнем положении — диаметром 1,2...3,0 мм. Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей используют легированные электродные проволоки марок Св-08ГС и Св-08Г2С. Проволоку марки 12ГС можно использовать для сварки низколегированных сталей 14ХГС, ЮХСНД и 15ХСНД и спокойных низкоуглеродистых сталей марок ВСт1 и ВСт2. Однако в целях предупреждения значительного повышения содержания углерода в верхних слоях многопроходных швов эту проволоку обычно применяют для сварки одно- или трехслойных швов.

Повышение коррозионной стойкости швов в морской воде достигается использованием электродной проволоки марки Св-08ХГ2С. Структура и свойства металла шва и околошовной зоны на низкоуглеродистых и низколегированных сталях зависят от марки использованной электродной проволоки, состава и свойств основного металла и режима сварки (термического цикла сварки, доли участия основного металла в формировании шва и формы шва).

Сварка при повышенной силе тока приводит к получению металла швов с пониженными показателями пластичности и ударной вязкости, что, вероятно, объясняется повышенными скорос-

тиями охлаждения. Свойства металла шва, выполненного на обычных режимах, соответствуют свойствам металла шва, выполненного электродами типа Э50А. В промышленности находит применение и сварка в углекислом газе порошковыми проволоками. Технологии этого способа сварки и свойства сварных соединений примерно такие же, как и при использовании их при сварке без дополнительной защиты.

**Сварка высоколегированных аустенитных сталей.** *Ручная дуговая сварка.* При сварке высоколегированных сталей сварочные проволоки одной марки имеют достаточно широкий допуск по химическому составу. Различие типов сварных соединений, пространственного положения сварки и других факторов способствуют изменению глубины проплавления основного металла, а также химического состава металла шва. Все это заставляет корректировать состав покрытия для обеспечения необходимого содержания в шве феррита и предупреждения образования в шве горячих трещин. Так же достигаются необходимая жаропрочность и коррозионная стойкость швов.

Применением электродов с фтористокальциевым покрытием, уменьшающим угар легирующих элементов, достигается получение металла шва с необходимым химическим составом и структурой. Уменьшению угара легирующих элементов способствует и поддержание короткой дуги без поперечных колебаний электрода. Это снижает вероятность появления дефектов на поверхности основного металла в результате попадания на него брызг.

Некоторые данные о режимах и выборе электродов для ручной дуговой сварки приведены в табл. 5.3.

**Таблица 5.3. Ориентировочные режимы ручной дуговой сварки аустенитных сталей**

Толщина материала, мм	Электрод		Сила сварочного тока, А, при положении сварки		
	Диаметр, мм	Длина, мм	нижнем	вертикальном	потолочном
До 2,3	2	150... 200	30... 50	—	—
2,5...3,0	3	225... 250	70... 100	50... 80	45... 75
3,0...8,0	3... 4	250... 300	85... 140	75... 130	65... 120
8,0... 12,0	4... 5	300... 400	85... 160	75... 150	65... 130

*Сварка в защитных газах.* Применение инертных газов существенно повышает стабильность дуги. Значительное различие теплофизических свойств защитных газов и применение их смесей, изменяя тепловую эффективность дуги и условия ввода теплоты в свариваемые кромки, существенно расширяют технологические возможности дуги. При сварке в инертных газах наблюдается минимальный угар легирующих элементов, что важно при сварке высоколегированных сталей. При сварке в защитных газах возможности изменения химического состава металла шва более ограничены по сравнению с другими способами сварки и возможны за счет изменения состава сварочной (присадочной) проволоки или изменения доли участия основного металла в образовании металла шва (режим сварки), когда составы основного и электроодного металлов значительно различаются.

При сварке плавящимся электродом появляется возможность изменения характера металлургических взаимодействий за счет значительного изменения состава защитной атмосферы, например создания окислительных условий в дуге, путем применения смеси газов, содержащих кислород, углекислый газ и др. Этим способом можно выполнять сварку в различных пространственных положениях, что делает ее целесообразной в монтажных условиях по сравнению с ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. Сварку в защитных газах можно выполнять неплавящимся вольфрамовым или плавящимся электродом.

Вольфрамовым электродом сваривают в инертных газах или их смесях. Для сварки высоколегированных сталей используют аргон высшего или 1-го сорта (ГОСТ 10157—73). Обычно сварку вольфрамовым электродом технически и экономически целесообразно использовать, если толщина металла не превышает 7 мм (при толщине металла менее 1,5 мм применение других способов дуговой сварки практически невозможно из-за образования прожогов). Однако в некоторых случаях, например при сварке неповоротных стыков труб, сварку вольфрамовым электродом применяют на сталях больших толщин.

В зависимости от толщины стали и конструкции сварного соединения сварку выполняют с присадочным материалом или без него, вручную с использованием специальных горелок или автоматически. Сварку ведут на постоянном токе прямой полярности. Исключение составляют стали и сплавы с повышенным содержанием алюминия, когда для разрушения поверхностной пленки окислов, богатой алюминием, следует применять переменный ток.

Сварку можно выполнять непрерывно горячей или импульсной дугой. Импульсная дуга благодаря особенностям ее теплового воздействия позволяет уменьшить протяженность околошовной зоны и коробление свариваемых кромок, а также сваривать металл малой толщины при хорошем формировании шва. Особенности кристаллизации металла сварочной ванны при этом способе сварки способствуют дезориентации структуры, уменьшая вероятность образования горячих трещин. Однако эта же особенность может способствовать образованию околошовных надрывов при сварке высоколегированных сталей. Для улучшения формирования корня шва используют поддув газа, а при сварке корневых швов на металле повышенных толщин — специальные расплавляющиеся вставки.

При сварке погруженной дугой особенности процесса, определяющие увеличение доли теплоты, идущей на расплавление основного металла, позволяют без разделки кромок за один проход сваривать металл повышенной толщины. Однако уменьшение концентрации нагрева приводит к термическому циклу сварки, сходному с термическим циклом при электрошлаковой сварке. В результате расширяется зона термического влияния и возникает опасность перегрева в ней основного металла, т.е. в ней возможно появление тех же дефектов, что и при электрошлаковой сварке.

Для высоколегированных сталей начинают применять и плазменную сварку, преимущество которой заключается в малом расходе защитного газа. Получение плазменных струй различного сечения (круглого, прямоугольного и т.д.) и значительное изменение расстояния от плазменной горелки до изделия значительно расширяют технологические возможности этого способа. Плазменную сварку можно использовать для очень тонких металлов и для металла толщиной до 12 мм. Применение ее для сварки сталей большой толщины затрудняется возможностью образования в швах подрезов.

Сварку плавящимся электродом выполняют в инертных, активных газах или их смесях. При сварке высоколегированных сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы (алюминий, титан и др.), следует использовать инертные газы, преимущественно аргон. При сварке в инертных газах возможен капельный и струйный перенос электродного металла. При струйном переносе дуга имеет наиболее высокую стабильность, значительно улучшается перенос электродного металла в сварочную ванну, исключается разбрызгивание металла, что особенно важно при сварке швов в вертикальном и потолочном положениях.

Отсутствие разбрызгивания и связанных с этим очагов коррозии благоприятно при сварке коррозионно-стойких и жаростойких сталей. Однако струйный перенос возможен при значениях тока выше критического, при которых возможно образование прожогов при сварке тонколистового металла. Добавка в аргон до 3...5 % кислорода уменьшает значение критического тока. Кроме того, создание при этом окислительной атмосферы в зоне дуги уменьшает вероятность образования пор, вызванных водородом. Последнее достигается и применением смеси аргона с 15...20 % углекислого газа, что позволяет уменьшить и расход дорогого и дефицитного аргона. Однако при указанных добавках газов увеличивается угар легирующих элементов, а при добавке углекислого газа возможно и науглероживание металла шва. Добавкой к аргону 5...10 % азота может быть повышено его содержание в металле шва. Азот, являясь сильным аустенитизатором, позволяет изменять структуру металла шва.

При сварке в углекислом газе низкоуглеродистых высоколегированных сталей с использованием низкоуглеродистых сварочных проволок, если исходная концентрация углерода в сварочной ванне менее 0,10 %, происходит науглероживание металла на 0,02...0,04 %. Этого достаточно для резкого снижения стойкости металла шва к межкристаллитной коррозии. Одновременно окислительная атмосфера, создаваемая в дуге за счет диссоциации углекислого газа, способствует угару до 50 % титана и алюминия.

Науглероживание металла шва в некоторых случаях может оказать благоприятное действие при сварке жаропрочных сталей. При наличии в металле шва энергичных карбидообразователей

**Таблица 5.4. Ориентировочные режимы сварки вольфрамовым электродом высоколегированных сталей**

Толщина металла, мм	Тип соединения	Ток дуги, А	Расход аргона, л/мин
1	С отбортовкой	35...60	3,5...4
2		75...120	5...6
3		100...140	6...7
1	Встык без разделки кромок с присадкой	40...70	3,5...4
2		80...130	5...6
3		120...160	6...7

(титана и ниобия) его науглероживание при увеличении в структуре количества карбидной фазы повышает жаропрочность. Недостатком сварки в углекислом газе является большое разбрызгивание металла (потери достигают 10...12 %) и образование на поверхности шва плотных пленок оксидов, прочно сцепленных с металлом. Это может резко снизить коррозионную стойкость и жаростойкость сварного соединения.

Сварку плавящимся электродом в защитных газах выполняют на постоянном токе на обратной полярности (табл. 5.4).

## 5.2. СВАРКА ЧУГУНА

Процесс графитизации, или выделения углерода в виде включений свободного графита, определяющий структуру и свойства чугуна, зависит от скорости его охлаждения и химического состава.

Свойства чугуна во многом зависят от формы графитовых включений. По этому признаку, а также по структуре матрицы различают следующие виды чугуна:

- серый — с пластинчатым графитом в ферритной или перлитной матрице (марки от СЧ10 до СЧ45, где числа соответствуют  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup>, для чугуна);
- ковкий — с хлопьевидным графитом в ферритно-перлитной матрице (от КЧ 30-6 до КЧ 63-2, где первое число означает  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup>, второе — удлинение, %);
- высокопрочный — с шаровидным графитом в ферритной, перлитной или бейнитной матрице (от ВЧ 38-7 до ВЧ 120-4);
- легированный — с пластинчатым или шаровидным графитом в ферритной, перлитной или аустенитной матрице: хромистый — до 36 % Cr (ИЧХ13ГЗБ); никелевый — до 20 % Ni (ЧН15Д7Х2); кремнистый — до 18 % Si (ЧС15М4); марганцевый — до 12 % Mn (ЧХ4Г7Д); алюминиевый — до 30 % Al (ЧЮ7Х2).

Низкая свариваемость чугунов связана с охрупчиванием сварного шва и зоны термического влияния в связи с отбеливанием при охлаждении после сварки, образованием горячих и холодных трещин, пористостью, обусловленной интенсивным газовыделением при сварке, и повышенной жидкотекучестью чугунов, затрудняющей удержание сварочной ванны от вытекания.

Различают сварку с подогревом (горячую) и без подогрева (холодную). Горячая сварка может проводиться со слабым подогревом (до 300...400 °С) и с сильным подогревом (до 600...700 °С). Технология горячей дуговой сварки чугуна включает в себя следующие операции: подготовка под сварку, предварительный подогрев, сварка и последующее медленное охлаждение изделий.

Горячая ручная дуговая сварка выполняется плавящимися покрытыми электродами. Плавящиеся электроды (ОМЧ-1, ВЧ-3, ЭП-4 и др.) состоят из чугунного стержня марок А и Б с содержанием 3,0...3,5 % углерода, 3...4 % кремния, 0,5...0,8 % марганца и стабилизирующего покрытия с добавкой графитизаторов. Сварку ведут при повышенных (по сравнению со сваркой стали) токах ( $I_{св} = (60...100)d$ ) с использованием специальных электрододержателей. Диаметр электродов может достигать 12 мм. Сварку осуществляют на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе. Скорость охлаждения при сварке не превышает 50 °С/ч.

Холодная ручная дуговая сварка чугуна осуществляется с применением электродов с повышенным содержанием графитизаторов (С, Si), которые позволяют получить в шве структуру серого чугуна, или с применением электродов на основе меди и никеля, которые обеспечивают пластичность металла шва, не образуют соединений с углеродом и не растворяют его, уменьшают отбеливание и способствуют графитизации. Сварку ведут с минимальным тепловложением для уменьшения зоны нагрева, в которой возможно образование закалочных структур и высоких остаточных напряжений. С этой целью делают перерывы для охлаждения. Применяют электроды малых диаметров (3...6 мм), небольшую силу тока ( $I_{св} = (20...30)d$ ), сварку осуществляют короткими участками (15...25 мм), после сварки проводят проковку шва (табл. 5.5).

Изделия из ковкого и высокопрочного чугуна успешно сваривают и наплавляют в углекислом газе проволоками диаметром 0,8...1,4 мм Св-08ГС, Св-08Г2С, Нп-30ХГСА и порошковыми проволоками без предварительного подогрева. В случае необходимости получения металла шва, который можно обрабатывать механически, используют проволоки Св-08ГС и Св-08Г2С. Свойства сварного соединения зависят от силы тока, скорости сварки и техники ее выполнения.

При сварке с силой тока 50...100 А и напряжением 18...20 В металл шва имеет ферритоперлитосорбитную структуру. Зона термического влияния и сплавления имеет троститно-мартенсит-

**Таблица 5.5. Параметры сварки чугуна электродами без подогрева**

Марка электрода	Рекомендуемые значения силы тока, А, при диаметре электрода, мм				Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Расход электродов на 1 кг наплавленного металла
	3	4	5	6		
ЦЧ-4	65...80	90...120	130...150	—	9...11	1,8
ОЗЧ-2	90...110	120...140	160...190	220...250	13...14	1,7
ОЗЖН-1	100...120	130...150	160...180	—	10...12	1,4
МНЧ-2	90...110	120...140	160...190	210...230	11...12	1,5

ную структуру с участками ледебурита по линии сплавления. Трещины в зоне термического влияния отсутствуют. При сварке на больших токах в шве появляется мартенсит и ледебурит, а в зоне термического влияния — участки отбела и микротрещины. При повышении напряжения увеличивается доля чугуна в металле шва и возможно образование трещин.

Для уменьшения доли основного металла в металле шва наплавку производят с перекрытием предыдущего валика на 1/3 его ширины. Дугу при этом направляют на ранее наплавленный металл. Скорости сварки и наплавки выбирают исходя из условия получения минимальной доли основного металла в металле шва и допустимого разогрева детали. В отдельных случаях для получения соединений с минимальным изменением структуры зоны термического влияния сварку и наплавку производят «каскадом» или с наложением отжигающих валиков. При этом металл шва имеет ферритоперлитную структуру без заметных изменений в зоне термического влияния.

Сварка в углекислом газе тонкой проволокой нашла применение в автомобильной и тракторной промышленности при соединении стальных патрубков с чугунными фланцами, при восстановлении изношенных деталей (ступиц колес, коленчатых валов и др.) из ковкого и высокопрочного чугуна, при сварке (при сантехнических работах) труб из серого чугуна.

Для холодной сварки серого чугуна разработана порошковая проволока ППЧ-1, имеющая следующий состав: 7,0...7,5 % С; 4,0...4,5 % Si; 0,4...0,8 % Mn; 0,4...0,6 % Ti; 0,6...0,9 % Al. Данная проволока с учетом окисления элементов и разбавления основ-

ным металлом при сварке со средней силой тока обеспечивает получение наплавленного металла и зоны сплавления без отбела и трещин. Механические свойства металла шва близки к основному металлу. Использование в качестве защиты углекислого газа — окислителя обеспечивает малое содержание в шве водорода и малую склонность металла шва к образованию пор.

### 5.3. СВАРКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Алюминиевые сплавы подразделяются на две группы: деформируемые и литейные. Теоретической границей, разделяющей эти сплавы, служит предел растворимости элементов в твердом растворе. Деформируемые сплавы имеют концентрацию легирующих элементов меньше предела растворимости и при нагреве могут быть переведены в однофазное состояние, при котором обеспечивается их высокая деформационная способность. Литейные сплавы лежат за пределами растворимости и имеют в структуре эвтектику. Наличие последней придает сплавам хорошие литейные свойства (жидкотекучесть, заполняемость формы), но ухудшает их способность к деформации.

Большинство элементов, входящих в состав алюминиевых сплавов, обладает ограниченной растворимостью, зависящей от изменений температуры. Это сообщает сплавам способность упрочняться термообработкой. Принципиально упрочнением при термообработке должны обладать все сплавы, имеющие концентрацию легирующих элементов сверх предела растворимости при комнатной температуре. В связи с этим сплавы подразделяются на сплавы, не упрочняемые термически, и сплавы, упрочняемые термически.

Среди литейных и деформируемых упрочняемых сплавов могут встретиться сплавы, имеющие незначительный эффект упрочнения. Поэтому наличие в составе сплава легирующих элементов сверх предела растворимости при комнатной температуре следует рассматривать как необходимое, но не обязательное условие способности сплавов упрочняться при термообработке.

В сварных конструкциях получили распространение деформируемые алюминий (АД, АД1 и др.) и алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой (АМц, АМг, АМгЗ, АМг6З, АМг6 и др.), а также упрочняемые (Д20, М40, Д20, ВАД23, В92А, 1201, 1420 и др.). Литейные сплавы используют в сварных конструкциях редко.

При сварке плавлением конструкций из алюминиевых сплавов возможны различные виды сварных соединений: стыковые, нахлесточные, тавровые и угловые. Наибольшее распространение получили стыковые соединения. Нахлесточные, тавровые и угловые соединения желательно выполнять аргонодуговой сваркой.

**Ручная сварка покрытыми электродами.** Ручную дуговую сварку покрытыми электродами применяют при толщине металла более 4 мм. Сварку осуществляют на постоянном токе обратной полярности без поперечных колебаний. При сварке технического чистого алюминия и сплавов типа АМц металлический стержень электрода изготавливают из проволок, близких по составу к основному металлу. Для сплавов типа АМг следует применять проволоку с повышенным содержанием магния (1,5...2,0 %) в целях компенсации его угара при сварке. Основу покрытия электродов составляют криолит, хлористые и фтористые соли натрия и калия.

При толщине металла более 10 мм необходима V-образная разделка кромок с углом раскрытия 60° и притуплением 1...2 мм. При сварке алюминия требуется предварительный подогрев металла до температуры 100...200 °С (особенно в начале шва). Диаметр электродов — 4...8 мм; сила сварочного тока —  $I_{св} = (45...55)d$  (табл. 5.6).

Для улучшения механических свойств сварных соединений осуществляют проковку или прокатку роликами шва в холодном

**Таблица 5.6. Ориентировочные режимы ручной дуговой сварки алюминия и его сплавов**

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	Ширина шва, мм
6	5	280...300	30...34	10
8	6	300...320	30...34	14
10	6...7	320...380	30...34	16
12	8	350...450	32...36	20
14	8	400...450	32...36	22
16	8	400...450	32...36	24
18	8...10	450...500	32...36	26
20	8...10	500...550	32...36	28

и теплом состоянии. При сварке термически упрочняемых сплавов можно повысить прочность сварного соединения до уровня основного металла последующей (после сварки) термообработкой сварного узла (закалка и искусственное старение)

**Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом.** При сварке неплавящимся вольфрамовым электродом стыковых соединений без разделки кромок для исключения оксидных включений в металле швов необходимо применять подкладки рациональной формы. Для сварки применяют подкладки без канавки и подкладки с различной формой канавки — прямоугольной и сложного профиля. При сварке на подкладке с канавкой сложного профиля торцовые поверхности кромок при расплавлении листов полностью выводятся в проплав и вероятность образования включений оксидных пленок снижается.

При сварке стыковых соединений в зависимости от толщины свариваемого металла и принятого метода сварки используют различные виды подготовки кромок. Помимо механической обработки кромок свариваемых деталей для придания им рациональной формы, облегчающей выполнение соединений, подготовка деталей к сварке включает в себя очистку их поверхности от загрязнений и оксидов. Следы масла, краски и другие загрязнения должны быть удалены или со всей поверхности свариваемых деталей или с их кромок на определенной ширине (20...30 мм) вдоль стыка. Для частичного или местного обезжиривания кромки протирают тряпкой, смоченной в бензине, ацетоне, четыреххлористом углероде, уайт-спирите и других жидкостях, хорошо растворяющих жировые загрязнения.

Технология обезжиривания поверхности детали в ванне щелочного состава, используемая на некоторых заводах, заключается в следующем:

- обезжиривание деталей в течение 58 мин в ванне с щелочным раствором при температуре 65 °С (состав раствора: 35... 50 г  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , 35... 50 г  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 30 г жидкого стекла, 1 000 мл воды);
- промывка в воде при температуре 30 °С;
- промывка в проточной холодной воде с протиркой тряпкой или волосяной щеткой;
- сушка.

После обезжиривания детали подвергают специальной обработке для удаления поверхностной оксидной пленки: механическим путем — зачисткой поверхности деталей наждачной бумагой,

шабером или проволочной щеткой; химическим путем — травлением деталей в специальных растворах. При массовом производстве механическая зачистка кромок не рекомендуется в связи с недостаточно высокой производительностью процесса и невысоким качеством подготовки поверхности.

Более производительным и надежным методом удаления оксидной пленки следует считать химическое травление деталей в ваннах со специальным составом по следующей технологии:

- травление в водном растворе NaOH (45... 50 г/л) при температуре 60... 70 °С, время травления — 1... 2 мин;
- промывка в горячей воде (60... 80 °С);
- промывка в проточной воде при комнатной температуре;
- осветление в 30%-ном растворе HNO<sub>3</sub> при комнатной температуре в течение 1... 2 мин;
- промывка в проточной воде при комнатной температуре, затем в горячей воде (60... 80 °С);
- сушка сжатым воздухом при температуре 80... 90 °С.

При сварке деталей из сплавов алюминия с повышенной концентрацией магния (например, сплав АМг6) непосредственно перед сваркой кромки и особенно торцы деталей зачищают шабером.

Подготовка поверхности проволоки включает в себя следующие основные операции: обезжиривание, травление, дополнительная обработка поверхности после травления в целях повышения плотности пленки и уменьшения запаса имеющейся в ней влаги.

Обезжиривание и травление проволоки проводят по технологии, принятой для обезжиривания и травления поверхности основного металла. Дополнительная обработка может быть различной: вакуумная сушка проволоки; механическая зачистка поверхности в специальном приспособлении; химическое или электрохимическое полирование поверхности.

**Сварка неплавящимся электродом с защитой аргоном.** При сварке в среде аргона алюминиевых сплавов отпадает необходимость применения флюсов. Это значительно упрощает процесс и делает возможным сварку соединений, опасных в коррозионном отношении из-за трудности удаления остатков флюсов.

Для сварки алюминиевых сплавов в среде защитных газов применяют аргон первого сорта или смеси аргона с гелием. При этом разрушение оксидной пленки происходит в результате катодного

распыления, в связи с чем сварку алюминиевых сплавов в арго-не желательно вести на постоянном токе обратной полярности. Это возможно при автоматической и полуавтоматической сварке плавящимся электродом.

При сварке вольфрамовым электродом вследствие большого выделения теплоты на аноде наблюдается чрезмерный перегрев и повышенный расход. Для уменьшения расхода вольфрама необходимо питание дуги переменным током. При этом в полупериоды, когда катодом является вольфрам, происходит его охлаждение, а в полупериоды, когда катодом является деталь, происходит разрушение и удаление оксидной пленки. При сварке на переменном токе удается сохранить достаточно высокую стойкость электрода и добиться удовлетворительного разрушения оксидной пленки на детали.

При сварке вольфрамовым электродом и питании дуги переменным током условия горения дуги в полупериоды разной полярности отличаются. В полупериод, когда вольфрам является катодом, благодаря мощной термоэлектронной эмиссии проводимость дугового промежутка возрастает, увеличивается ток и снижается напряжение дуги.

В полупериод, когда катодом становится изделие (холодный катод), проводимость дугового промежутка снижается, уменьшается сила тока дуги и возрастает напряжение. В результате этого синусоида тока дуги оказывается несимметричной, что равносильно действию в цепи дуги некоторой постоянной составляющей тока.

Благодаря этому процесс успешно используют при сварке металла толщиной 0,8...3,0 мм.

Применение импульсной дуги для сварки алюминиевых сплавов расширило возможности сварки неплавящимся электродом. При сварке импульсной дугой на переменном токе удается сваривать алюминиевые сплавы толщиной более 0,2 мм. Стыковые соединения металла толщиной 0,2...1,0 мм сваривают с применением присадочной проволоки диаметром 0,6...2,6 мм на стальных подкладках с формирующими канавками. При сварке импульсной дугой алюминиевых сплавов толщиной 0,2...1,0 мм коробление кромок снижается на 40...60 %.

Для сварки металла больших толщин использовать обычный процесс сварки вольфрамовым электродом нецелесообразно из-за необходимости применения многослойных швов и снижения производительности. Для сварки вольфрамовым электродом металла большей толщины необходимо повысить стойкость вольфрамовых

электродов. Вольфрамовые электроды марки ВИ с добавками иттрия отличаются повышенной стойкостью. Допустимый сварочный ток для электродов этой марки диаметром 10 мм достигает 800...1 000 А. С появлением этих электродов открылась возможность сваривать за один проход высокоамперной дугой металл толщиной до 20 мм.

При сварке вольфрамовым электродом непрерывно горящей дугой не удается получить качественных соединений из металла толщиной меньше 0,8 мм. Это объясняется тем, что снижение тока до величины, меньшей 10 А, приводит к нарушению устойчивости горения дуги. Из-за блуждания дуги возникает необходимость сварки при коротком дуговом промежутке, благодаря чему очень часто наблюдаются короткие замыкания электрода на деталь.

**Сварка плавящимся электродом.** Данный способ применяется для сварки алюминия и его сплавов толщиной более 4 мм. Надежное разрушение пленки оксидов при таком способе автоматической и полуавтоматической сварки в аргоне, гелии или смеси этих газов достигается лишь при питании дуги постоянным током обратной полярности. Механизм удаления оксидной пленки в этом случае заключается в разрушении и распылении ее тяжелыми положительными ионами, бомбардирующими катод (используется так называемый эффект катодного распыления). Недостаток способа сварки алюминия плавящимся электродом — некоторое снижение (по сравнению со сваркой неплавящимся электродом) показателей механических свойств. Так, для сплава АМг6 снижение предела прочности может достигать 15 %. Уменьшение прочности шва объясняется тем, что электродный металл, проходя через дуговой промежуток, перегревается в большей степени, чем присадочная проволока при сварке неплавящимся электродом. К преимуществам данного способа сварки относятся хорошее перемешивание сварочной ванны и в связи с этим лучшее очищение шва от оксидных включений, а также высокая производительность.

Для сварки применяют проволоку диаметром не менее 1,2...1,5 мм, так как из-за недостаточной жесткости сварка алюминиевой проволокой меньшего диаметра затруднена. При использовании проволоки указанных диаметров устойчивый процесс можно получить при токах не менее 130...140 А, позволяющих сваривать за один проход металл толщиной 4...5 мм. При сварке в горизонтальном или потолочном положении сварочный ток уменьшается на 10...15 %. Для питания дуги используют источники тока с жесткой внешней характеристикой.

Рабочее давление инертного газа такое же, как и при сварке неплавящимся электродом. Рекомендуется устанавливать расстояние между нижним срезом наконечника горелки и поверхностью детали в пределах 5...15 мм. Сварку плавящимся электродом выполняют в аргоне или смеси аргона с гелием (объемное содержание гелия — до 70 %). Газовая смесь заслуживает предпочтения при сварке металла больших толщин. При объемном содержании в смеси 30 % Ar и 70 % He за один проход можно сварить металл толщиной 16 мм, а за два прохода — толщиной до 30 мм. При защите зоны сварки газовой смесью (35 % Ar и 65 % He) повышается плотность металла шва.

Все способы и режимы сварки технического алюминия пригодны и для термически неупрочняемых алюминиевых сплавов типа АМц и АМг. При сварке высокопрочных алюминиевых сплавов, особенно термически упрочненного основного металла, в каждом конкретном случае приходится изыскивать пути повышения стойкости шва и околошовной зоны к образованию трещин и устранения других дефектов (металлургические приемы — выбор присадного металла оптимального состава в сочетании с технологическими приемами: подбор режимов сварки, рациональный порядок выполнения швов, предварительный и сопутствующий подогревы и др.), а также увеличения коэффициента прочности сварных соединений. Введение модификаторов (циркония, титана, бора) в проволоку позволяет резко повысить стойкость швов к образованию кристаллизационных трещин. Для ряда высоколегированных сплавов (например, систем Al—Mg и Al—Cu) хорошие результаты достигаются при использовании проволоки с пониженным содержанием сопутствующих примесей. В ряде случаев удовлетворительные свойства швов на высокопрочных сплавах можно получить при сварке проволокой, отличающейся по составу от основного металла (например, проволока марки Св-АК5 для сплавов типа АВ, АД31, АД33).

**Плазменная и микроплазменная сварка.** Плазменная сварка в связи с необходимостью разрушения и удаления оксидной пленки выполняется сжатой дугой переменного и постоянного тока обратной полярности. Она обеспечивает ряд технологических преимуществ по сравнению с обычной аргонодуговой сваркой алюминия и его сплавов неплавящимся электродом, позволяет повысить производительность сварочных работ на 50...70 %, снизить расход аргона в 4—6 раз, улучшить качество сварных соединений. При плазменной сварке на переменном токе эффективный КПД нагрева повышается до 65...70 % по сравнению с 45...50 %

при обычной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на переменном токе. Из сравнения режимов плазменной и аргонодуговой сварки следует, что минимальная погонная энергия соответствует сварке сжатой дугой на постоянном токе при обратной полярности. Поэтому данный способ имеет преимущества, в первую очередь, при сварке конструкций из нагартованных и термически упрочненных алюминиевых сплавов. Уменьшая погонную энергию при сварке, можно снизить суммарный объем несплошностей в шве вследствие торможения реакции разложения остатков влаги в оксидной пленке во время существования сварочной ванны. При плазменной сварке на постоянном токе снижается расход присадочной проволоки до 40 %, заметно сужаются швы, можно получить удовлетворительные механические свойства швов при нетравленном основном металле. В этом отношении лучшие результаты дает сварка проникающей сжатой дугой. Сжатая дуга проникает через кратер в ванне на всю толщину основного металла; при этом особенно эффективно проявляется катодная очистка. Для заполнения отверстия под дугой в зону сварки подается присадочная проволока. Погружение сжатой дуги в металл возможно при ручной сварке.

Плазменную сварку стыковых соединений из алюминиевых сплавов толщиной до 8 мм выполняют без разделки кромок с зазором до 1,5 мм за один проход на стальной подкладке или с двух сторон «на весу». Для сварки на переменном токе используются серийные трансформаторы, обладающие требуемыми электродинамическими характеристиками. Вторичные обмотки включают последовательно, обеспечивая при этом напряжение без нагрузки 120 В. Постоянную составляющую уменьшают путем включения в цепь батареи конденсаторов или омического сопротивления (например, балластного реостата типа РБ-300). Между вольфрамовым электродом (анодом) и соплом (катодом) горит вспомогательная дуга, которая питается выпрямленным током 20... 25 А.

Микроплазменную сварку успешно применяют для алюминия и его сплавов толщиной 0,2... 1,5 мм. Сварку выполняют на переменном токе (10... 100 А) от специализированных источников питания. Питание для малоамперной дежурной дуги (1,0... 5,0 А) подается от отдельного источника постоянного тока. В качестве плазмообразующего газа используют аргон (расход газа — 0,25... 0,30 л/мин), для защиты зоны сварки — аргон и гелий. Расход защитного газа (гелия) для алюминия толщиной 0,2... 1,5 мм — не более 2,5 л/мин. При ручной сварке скорость составляет 12... 16 м/ч. Возможна сварка с присадочной проволокой диамет-

ром 0,8...1,5 мм. Соединения, выполненные микроплазменной сваркой, практически равноценны основному металлу — техническому. При сварке алюминиевых сплавов коэффициент прочности швов — около 0,9. Для микроплазменной сварки металла малых толщин требуется прецизионная технологическая оснастка. Необходимо обеспечить плотное прижатие свариваемых кромок к подкладкам и надежный теплоотвод от кромок.

При сварке стыковых швов допускаются зазоры не более 15 % толщины металла и превышение одной кромки над другой не более чем на 20 % толщины. Одной из важных особенностей микроплазменной сварки является снижение деформации изделий (на 25...30 %) по сравнению с обычной аргонодуговой сваркой.

## 5.4. СВАРКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Чистый магний обладает относительно невысокой прочностью (предел прочности — 80...110 МПа) и малой пластичностью. При температуре выше 300 °С пластичность магния увеличивается. В качестве конструкционных материалов наибольшее применение получили сплавы магния, отличающиеся более высокой прочностью.

Плотность магния составляет 1,738 г/см<sup>3</sup>, т.е. почти в 1,5 раза меньше плотности алюминия и в 4,5 раза меньше плотности железа. Вследствие этого показатели свойств многих сплавов на основе магния выше, чем показатели свойств сталей и высокопрочных алюминиевых сплавов и даже некоторых сплавов на основе титана.

Наиболее распространенные легирующие элементы, упрочняющие магниевые сплавы, — алюминий и цинк, однако их упрочняющее действие сохраняется до температуры 150... 200 °С.

Отличительное свойство магния и его сплавов — повышенная чувствительность к коррозии во многих средах. Это объясняется тем, что оксидная пленка на поверхности магния рыхлая и не обладает такими высокими защитными свойствами, как, например, оксидная пленка на поверхности алюминия. Наилучший способ защиты от коррозии изделий из магниевых сплавов — нанесение на их поверхность плотных оксидных пленок или специальных лакокрасочных покрытий. В целях уплотнения оксидных пленок в состав магниевых сплавов часто вводят примеси бериллия.

При кристаллизации магний склонен образовывать грубую крупнокристаллическую структуру. Для измельчения зерна и по-

вышения механических свойств в состав многих магниевых сплавов вводят модификаторы, например цирконий или церий.

В зависимости от способности к деформированию магниевые сплавы, так же как и алюминиевые, подразделяются на две основные группы: деформируемые и литейные.

По чувствительности к термообработке различают магниевые сплавы, термически упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

По основным свойствам и областям применения магниевые сплавы подразделяются на три группы: общего назначения, высокопрочные, жаропрочные.

В зависимости от системы легирования различают несколько групп деформируемых сплавов:

- к системе Mg—Mn относится сплав МА-1, содержащий 1,8...2,5 % марганца, и сплав МА-8, легированный дополнительно 0,2 % церия в целях измельчения зерна и улучшения механических свойств. Сплавы этой системы не упрочняются термообработкой и относительно хорошо свариваются;
- к системе Mg—Al—Zn относятся сплавы МА-2, МА-2-1, МА-2-ШЧ, МА-5. Сплав МА-2 содержит 3...4 % Al, 0,2...0,8 % Zn, 0,15...0,5 % Mn. Сплав МА-2-1 отличается большей степенью легирования, лучшей обрабатываемостью и хорошей свариваемостью. Сплав МА-2-1ПЧ изготавливают из компонентов высокой чистоты; он содержит меньше примесей, более пластичен и имеет более высокую коррозионную стойкость. Сплав МА-5 содержит 7,8...9,2 % Al, характеризуется большей прочностью. В связи с ограниченным содержанием легирующих элементов (до 8 % Al) сплавы этой группы не упрочняются термообработкой;
- к системе Mg—Zn—Zr относится сплав МА 14. Он содержит 5...6 % цинка и 0,3...0,9 % циркония, отличается высокими показателями механических свойств благодаря упрочняющему действию цинка и модифицирующему влиянию циркония. Сплав упрочняется термообработкой (старение при 160...170 °С в течение 24 ч), характеризуется высокой жаропрочностью, но плохой свариваемостью.

К литейным относятся сплавы МЛ-2 (система Mg—Mn), МЛ-3, МЛ-4, МЛ-5, МЛ-6, МЛ7-1 (система Mg—Al—Zn), МЛ-10, МЛ-12 (система Mg—Zn—Zr) и др.

*Магний* — один из наиболее активных по отношению к кислороду металлов. В результате его окисления образуется оксид магния  $MgO$ , покрывающий поверхность металла пленкой. Температура плавления оксида магния —  $2800\text{ }^{\circ}C$ , плотность —  $3,65\text{ г/см}^3$ . В связи с высокой температурой плавления оксидная пленка на поверхности магниевых сплавов, так же как и при сварке алюминия, затрудняет образование общей сварочной ванны и поэтому должна быть разрушена или удалена в процессе сварки. Оксидная пленка на магниевых сплавах имеет плохие защитные свойства и способна удерживать большое количество влаги.

Помимо кислорода в атмосфере, окружающей ванну, могут присутствовать газы  $CO$ ,  $CO_2$ , пары воды, азот и водород. Магний реагирует со всеми этими газами, образуя карбиды, нитриды и оксиды. При температуре  $600\text{...}700\text{ }^{\circ}C$  и выше магний взаимодействует с азотом, образуя нитрид  $Mg_3N_2$ . Нитриды не только служат очагами коррозии, но и ухудшают механические свойства сплавов.

Водород обладает способностью растворяться в магнии. При температуре плавления растворимость водорода в жидком магнии достигает примерно  $0,5\text{ см}^3/\text{г}$  и резко уменьшается при кристаллизации. В связи со снижением растворимости водорода в жидком металле при охлаждении возможно выделение водорода в виде пузырьков и образование пористости. При наличии в сплавах сильных гидрообразователей, например циркония, критическая концентрация водорода в жидком металле, способная привести к пористости, возрастает.

При сварке в аргоне с высоким содержанием влаги и аргоне с добавками водорода в металле шва образуется своеобразная пористость в виде елочек в связи с бурным выделением водорода из жидкого и кристаллизующегося металла, при котором образующиеся пузырьки «обжимаются» растущими с большой скоростью дендритами.

Основная причина появления пор при сварке магниевых сплавов — выделение водорода, образующегося при разложении остатков влаги, которая содержится в частицах оксидной пленки, образовавшихся при расплавлении основного и присадочного металлов. При таком механизме образования пор (характерном для сплава АМгб) водород выделяется в молекулярной форме, минуя стадию растворения. Число несплошностей, образующихся при охлаждении, зависит от числа частиц оксидной пленки, образовавшихся в ванне в процессе сварки, и от запаса имеющейся влаги в оксидной пленке.

В качестве основных методов предотвращения образования пористости при сварке магниевых сплавов могут быть рекомендованы уменьшение частиц оксидной пленки, образовавшихся в ванне (уменьшение площади поверхности основного и присадочного металлов, участвующих в образовании шва), а также применение рациональной обработки поверхности проволоки и кромок свариваемых изделий.

При кристаллизации чистого магния в металле шва образуется грубая крупнокристаллическая структура. Эта тенденция сохраняется и при кристаллизации многих сплавов, в первую очередь, сплавов, не содержащих модификаторов.

Большинство элементов обладает ограниченной растворимостью в магнии и образует с магнием системы с эвтектикой. При скорости охлаждения  $50 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$  возникают неравновесные эвтектики в сплавах систем Mg—Al и Mg—Zn. Появления эвтектики по границам зерен в виде тонких сплошных прослоек часто приводит к образованию горячих трещин.

Повышение сопротивляемости сплавов образованию горячих трещин во многих случаях достигается введением в их состав модификаторов. Важным средством металлургического воздействия в целях предупреждения горячих трещин служит ограничение в сплавах примесей, способных образовывать выделения типа эвтектики.

Большинство магниевых сплавов обладает склонностью к росту зерна при нагреве. При сварке магниевых сплавов, упрочняемых термообработкой, наряду с ростом зерна в околошовных зонах возможны распад твердого раствора и оплавление границ зерен. Эти процессы приводят к существенному разупрочнению металла околошовной зоны (предел прочности достигает  $0,7 \dots 0,9$  предела прочности основного металла) и иногда к образованию трещин. Степень разупрочнения металла в околошовной зоне зависит от принятого термического цикла сварки и состава свариваемого металла.

В связи с высоким коэффициентом теплового расширения магниевых сплавов при местном нагреве, характерном для сварки, в соединениях возникают значительные напряжения, вызывающие коробление конструкций. Вследствие этого при сварке с жестким закреплением соединяемых элементов возможно образование трещин. Для предупреждения трещин и уменьшения коробления в некоторых случаях рекомендуется сварка конструкций с подогревом, а иногда и последующая их термообработка для снятия напряжений.

В настоящее время применяются в основном методы дуговой сварки магниевых сплавов в среде аргона вольфрамовым электродом. Предпочтительное соединение — стыковое. У полученных сваркой нахлесточных, а иногда и тавровых соединений с неполным проплавлением сечения оставшиеся зазоры могут стать в дальнейшем очагами коррозии. У нахлесточных и тавровых соединений необходимо исключить оксидные включения в корневой части шва. Для стыковых соединений эта задача решается просто: применяют сварку на подкладках с достаточно глубокими канавками, обеспечивающими удаление оксидных включений в проплав.

Сваркой встык без разделки кромок рекомендуется изготавливать соединения только за один проход при односторонней сварке с подкладками, имеющими канавки. Получать двухсторонней сваркой стыковые соединения без разделки кромок не рекомендуется из-за опасности появления в швах большого числа оксидных включений.

При сварке изделий из металла толщиной более 6...10 мм применяют V-образную разделку кромок, а из металла толщиной более 20 мм при наличии подхода с двух сторон — X-образную разделку кромок. В последнем случае перед выполнением шва с обратной стороны необходима предварительная разделка корневой части первого шва.

Непосредственно перед сваркой поверхность кромок свариваемых изделий подвергают специальной обработке для удаления оксидной или защитной пленки и имеющихся загрязнений. Поверхность кромок зачищают шабером или стальными щетками или обрабатывают в ваннах специального состава.

У изделий больших размеров более удобна зачистка шабером кромок непосредственно перед сваркой. Рекомендуется также зачистка шабером кромок непосредственно перед сваркой изделий, подвергающихся химической обработке, особенно после хранения их по истечении допустимого времени.

Поверхность проволоки обрабатывают по приведенной ранее технологии или в ванне для травления раствором концентрации 180 г/л  $\text{CrO}_3$  при температуре 90 °С в течение 5 мин.

Ручную аргонодуговую сварку выполняют на стальных подкладках с канавками для формирования проплава. Для разрушения оксидной пленки используют переменный ток. Диаметр выходного сопла для аргона изменяется в зависимости от силы сварочного тока: от 8 мм при силе тока 50 А до 20 мм при силе тока более 400 А.

Ручной аргодуговой сваркой встык без разделки кромок за один проход могут быть сварены листы толщиной 2...6 мм при силе тока 160...175 А. При толщине свариваемых элементов более 5 мм при аргодуговой сварке необходимы разделка и заполнение ее за несколько проходов. Процесс многослойной сварки усложняется из-за необходимости тщательной зачистки поверхности предыдущих швов перед наложением последующих. При многослойной аргодуговой сварке в металле швов появляются включения вольфрама и оксидных пленок.

Аргодуговую сварку магниевых сплавов плавящимся электродом целесообразно выполнять при толщине металла более 5...6 мм. Сварка производится от источника постоянного тока обратной полярности. В зависимости от диаметра проволоки и параметров режима сварки наблюдаются различные типы переноса металла через дуговой промежуток. Для сварки магниевых сплавов больших толщин лучшие результаты получаются на режимах, соответствующих струйному переносу. Листы толщиной до 5 мм рекомендуется сваривать встык за один проход без разделки кромок, толщиной 10...20 мм — с V-образной разделкой (притупление — 2...6 мм, угол раскрытия — 50...60°); плиты толщиной более 20 мм — с X-образной разделкой (притупление — 2...3 мм, угол раскрытия — 60...80°).

Скорость плавления магниевой электродной проволоки вдвое больше скорости плавления алюминиевой проволоки такого же диаметра при одинаковом сварочном токе, поэтому сварка плавящимся электродом магниевых сплавов эффективнее, чем сварка алюминиевых сплавов, особенно при многопроходной сварке.

Техника сварки плавящимся электродом имеет некоторые особенности. Для обеспечения надежной газовой защиты необходимо, чтобы расстояния от сопла до поверхности изделия и от токоведущего мундштука до края сопла были оптимальными (10...15 и 5...10 мм соответственно). При их увеличении ухудшается газовая защита, увеличивается разбрызгивание электродной проволоки. Уменьшение размеров приводит к перегреву мундштука, засорению сопла брызгами металла. Положение электрода оказывает существенное влияние на формирование шва; ось проволоки должна находиться под углом 90° к изделию при сварке стыковых соединений без разделки кромок или с небольшой разделкой кромок. Сварку магниевых сплавов большой толщины с глубокой разделкой целесообразно выполнять наклонными электродами — вперед под углом 7...15° к вертикали.

Импульсно-дуговая сварка очень перспективна для магниевых сплавов. Импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом рекомендуется выполнять в смеси с объемным содержанием 75 % Ar, 25 % He. Благодаря такому способу сварки обеспечиваются устойчивые режимы при увеличенных диаметрах электродной проволоки, уменьшается пористость швов, что объясняется повышенной погонной энергией и, как следствие, более длительным существованием сварочной ванны, а также возможностью выхода газов из жидкого металла.

## 5.5. СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Титан и его сплавы обладают высоким сродством к кислороду, азоту и водороду. Интенсивное окисление титана начинается при нагреве выше 400 °С, а взаимодействие с азотом — при нагреве выше 600 °С. Поглощение водорода титаном в тысячи раз больше, чем железом. Эти газы, а также углерод снижают пластичность и повышают твердость титана.

Технический титан и ряд его сплавов используют для изготовления сварных конструкций. Основным требованием при их сварке является предупреждение попадания газов и углерода в зону сварки к участкам, нагреваемым выше 400 °С. Сварку ведут в аргоне марки А и химически чистом гелии с дополнительной защитой шва и основного металла. При хорошей защите шов имеет серебристую блестящую поверхность. Наличие цветов побежалости, серые и бурые налеты свидетельствуют о плохой защите. Для предупреждения попадания газов и углерода в зону сварки необходимо тщательно очищать поверхность свариваемых кромок и проволоку. Очистку выполняют механическим путем с обезжириванием. Сборка соединений производится аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом. Для улучшения защиты корня шва его подваривают сплошным швом.

Режимы сварки выбирают исходя из толщины металла с учетом склонности сплава к росту зерна и термическому циклу. Для уменьшения роста зерна рекомендуются режимы с малой погонной энергией и повышенными скоростями. Учитывая высокое электросопротивление титана, сварку ведут с малыми вылетами электрода. При сварке на низких режимах возможен непровар корня шва. Во избежание этого рекомендуют корень шва выполнять аргонодуговой сваркой вольфрамовым электро-

дом, а остальное сечение шва — сваркой плавящимся электродом.

При сварке в аргоне на больших токах вследствие низкой теплопроводности титана и мощного потока паров, истекающих с титанового электрода, наблюдаются узкое глубокое проплавление и поры в корне шва. Для расширения проплавления и исключения пор сварку рекомендуют выполнять в гелии и смеси гелия с аргонном (20 % Ar). В тех случаях, когда к размеру и форме шва предъявляют повышенные требования, после сварки плавящимся электродом края шва переплавляют вольфрамовым электродом или накладывают поверх облицовочный шов. Свойства сварных соединений определяются составом электродной проволоки, режимом сварки и последующей термической обработкой соединения. Выпускают ряд сварочных проволок диаметром 0,8...7 мм; проволока поставляется чистой после вакуумного отжига.

Для сварки технического титана и однофазных сплавов используют проволоку марки ВТ1, а для более прочных — ВТ2, ВТ5 и др. В целях повышения прочности, пластичности и стойкости к образованию трещин сварные соединения термически упрочняемых сплавов подвергают термической обработке, режим которой зависит от состава сплава и необходимых свойств. При правильном выборе проволоки, режимов и термической обработки механические свойства соединений близки к свойствам соединений, выполненных вольфрамовым электродом. Основными дефектами сварных соединений на сплавах титана являются поры и трещины, которые появляются обычно при попадании в зону сварки кислорода, азота, водорода и при повышенных скоростях сварки. Использование чистой проволоки, чистых газов и уменьшение скоростей сварки позволяют предупредить образование пор и трещин.

Сварка титана неплавящимся электродом осуществляется постоянным током прямой полярности, т.е. электрод является катодом. Рабочая часть неплавящегося электрода затачивается на конус. Угол заточки зависит от толщины свариваемого металла и составляет 30...45°. Могут применяться электроды и с большим углом заточки, однако при этом снижается глубина проплавления. Для улучшения формирования шва при автоматической сварке с присадочной проволокой и повышения стойкости электрода его конус притупляют до диаметра 0,5...0,8 мм, что способствует расфокусировке дуги и более плавному переходу от основного металла к усилению. Работоспособность неплавящегося элек-

трода увеличивается со снижением шероховатости его конической части.

Качество защиты при сварке влияет не только на газонасыщенность шва, но и на стойкость неплавящегося электрода. Диаметр неплавящегося электрода выбирается в зависимости от величины сварочного тока с учетом допустимой токовой нагрузки на электроды. Наиболее широко распространены электроды марок СВИ и ВЛ. Их применение технологически и экономически более целесообразно, чем электродов ЭВЧ.

Чтобы избежать излишнего перегрева околошовных участков, при дуговой сварке титана ограничивают сварочный ток. Максимальный ток при сварке титана поверхностной дугой неплавящимся электродом обычно не превышает 300 А. Это позволяет сваривать без разделки кромок за один проход титановые сплавы толщиной до 3 мм. Стыковые соединения титана больших толщин выполняют многослойной сваркой с разделкой кромок и подачей присадочной проволоки. Ручную сварку ведут без колебательных движений горелки на короткой дуге углом вперед. Угол между электродом и присадочной проволокой поддерживается в пределах 90°, а подача проволоки осуществляется непрерывно. После окончания сварки или случайного обрыва дуги аргон должен подаваться до тех пор, пока металл не остынет примерно до 400 °С. Типичные разделки кромок стыковых соединений представлены на рис. 1.3—1.5.

Для сварки титана и его сплавов толщиной 0,5...2,0 мм применяется ручная *импульсно-дуговая сварка неплавящимся электродом*, которая ведется импульсами тока прямой полярности. Между неплавящимся электродом и свариваемым изделием постоянно поддерживается от отдельного источника питания малоамперная дежурная дуга (0,8...10,0 А), на которую накладываются импульсы тока. Регулируя силу тока, скорость сварки, длительность импульса и паузы, можно в широких пределах изменять размеры шва.

При сварке импульсной дугой деформации конструкций из титановых сплавов на 15...30 % меньше, чем при сварке непрерывной дугой. Можно также снизить уровень остаточных напряжений и склонность к образованию пористости в швах; уменьшаются протяженность ЗТВ и размеры кристаллитов в металле шва. Все это способствует заметному улучшению механических свойств соединений.

*Сварку плавящимся электродом* в среде инертных газов применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из ти-

тана и титановых сплавов толщиной более 3...4 мм в нижнем положении. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности.

Устойчивое горение дуги с минимальным разбрызгиванием расплавленного металла достигается при струйном характере переноса электродного металла. Эта форма переноса обеспечивается при определенном соотношении силы тока сварки, напряжения на дуге, скорости подачи электродной проволоки и вылета электрода. Переход к струйному переносу при сварке титановых сплавов наблюдается при соответствующей плотности тока, зависящей от диаметра электродной проволоки. Устойчивое горение дуги обуславливается также использованием источников питания с жесткой или пологопадающей вольт-амперной внешней характеристикой с высокими динамическими свойствами.

Однопроходная сварка титановых сплавов плавящимся электродом целесообразна при толщине металла не более 25 мм. Для больших толщин рекомендуется применять многопроходную сварку с разделкой кромок. Оптимальный угол раскрытия кромок — 60°, притупление — 3...5 мм.

*Микроплазменную сварку* применяют для соединения титана толщиной до 1,5 мм, осуществляют сжатой дугой прямого действия постоянного тока прямой полярности. В качестве плазмообразующего газа применяют аргон, в качестве защитного — гелий или смесь гелия с аргоном (объемное содержание гелия — 50...75 %). Electroдами являются вольфрамовые прутки диаметром 0,8...2,0 мм марок ВЛ и ВИ. Микроплазменную сварку осуществляют в непрерывном и импульсном режимах. Детали с толщиной соединяемых элементов до 0,3 мм сваривают по отбортованным кромкам, для большей толщины металла применяют другие типы соединений.

При микроплазменной сварке к сборке стыковых и торцовых соединений предъявляют высокие требования. Сборку деталей под сварку производят в прецизионных приспособлениях. Оснастка должна обеспечивать плотный прижим свариваемых кромок как к подкладной пленке, так и друг к другу. Шероховатость кромок должна быть не менее  $Ra = 12,5$  мкм. Непосредственно перед сваркой оснастку и кромки очищают и обезжиривают.

В процессе сварки необходимо строго соблюдать все параметры режима сварки, в первую очередь, силу тока тока, а также режим заданного расхода плазмообразующего газа, поскольку он во многом определяет кинетическую энергию и проплавливающую способность микроплазменной струи.

## 5.6. СВАРКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Чистую медь в соответствии с ГОСТ 859—78 выпускают девять марок: от М00бк до М4. Основными сплавами на основе меди являются латуни и бронзы.

*Латуни* — это медно-цинковые сплавы, химический состав которых определяется ГОСТ 15527—2004 и ГОСТ 17711—93. Латуни, содержащие до 39 % Zn, очень пластичны, коррозионно-стойки и хорошо свариваются. Практическое применение находят латуни не более чем с 50 % Zn. Специальные латуни кроме Zn содержат Fe, Al, Si, Ni и другие компоненты (ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1 и т.д.). Алюминий уменьшает летучесть цинка, образуя на поверхности расплавленной латуни защитную пленку из оксида алюминия. Железо измельчает зерно, повышая механические и технологические характеристики сплава. Кремний улучшает свариваемость латуней.

*Бронзы* представляют собой сплавы меди, содержащие не более 4...5 % Zn. Основными легирующими элементами являются Sn, Al, Mn, Si, Be и Fe. Бронза получает свое название по основному легирующему элементу. Бронзы подразделяются на две большие группы: оловянные, химический состав которых определяется ГОСТ 18175—78, ГОСТ 613—79, и безоловянные (ГОСТ 493—79, ГОСТ 18175—78).

Высокая тепло- и температуропроводность меди создает большие градиенты температуры и скорости охлаждения, а также обуславливает малое время существования сварочной ванны, что требует подвода повышенной погонной энергии или применения предварительного подогрева. Значительный коэффициент линейного расширения приводит к необходимости сварки при жестком закреплении кромок или по прихваткам. При большой толщине металла следует регулировать величину зазора в стыке.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами выполняется на постоянном токе обратной полярности. Медь толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок, до 10 мм — с односторонней разделкой с углом раскрытия до 70° и притуплением 1,5...3,0 мм. При большей толщине свариваемых образцов рекомендуется X-образная разделка.

Для сварки латуней, бронз и медно-никелевых сплавов применяют электроды марок ММЗ-2, ЦБ-1, МН-4, а также электроды с толстыми покрытиями ЗТ и «Комсомолец-100». Для стержней электродов марки «Комсомолец» применяют медь марок М1 и

М2. В электродах ЗТ используют стержень из бронзы БрКМцЗ-1. Сварку выполняют короткой дугой без поперечных колебаний при постоянном токе обратной полярности. Сила сварочного тока  $I_{св} = (50...60)d$ .

Листы толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок и подогрева. При толщине 5...8 мм металл подогревают до температуры 200...300 °С, при толщине 24 мм — до 750...800 °С. Латунь сваривают с предварительным подогревом, поддерживая пониженные токи и повышенные скорости.

Сварку бронз покрытыми электродами выполняют при постоянном токе обратной полярности как с предварительным подогревом, так и без него; диаметр электродов составляет 6...8 мм, применяемые токи — 160...280 А.

Сварка меди затруднена интенсивным ее окислением в нагретом и расплавленном состоянии, большой жидкотекучестью и высокой теплопроводностью. Свариваемость меди зависит от содержания в ней кислорода, висмута и свинца. В случае повышенного содержания этих элементов в металле шва и околошовной зоне образуются трещины. При сварке меди, содержащей кислород, попадание водорода в зону дуги приводит к образованию пор и трещин.

Для хорошей свариваемости в меди не должно быть более 0,03 %  $O_2$ , а для ответственных конструкций — не должно быть более 0,01 %  $O_2$ . Введение в металл шва кремния, алюминия и титана раскисляет шов и повышает его стойкость к образованию пор и трещин.

Медь хорошо сваривается плавящимся электродом в аргоне, азоте, в смеси аргона с азотом и в гелии. Наилучшее формирование шва имеет место в аргоне и гелии. При сварке в азоте снижается ее стоимость и повышается производительность. Из-за высокой теплопроводности меди для получения надежного провара в начале сварки и хорошего сплавления по кромкам детали подогревают до 200...500 °С.

При сварке в аргоне подогрев необходим при толщине металла более 4,5 мм, а в азоте — более 8,0 мм. При выполнении сварки двумя дугами в аргоне удастся сваривать без подогрева медь толщиной до 12,7 мм.

Стыковые соединения сваривают обычно на подкладных планках. Импульсно-дуговая сварка в аргоне обеспечивает возможность выполнения вертикальных и потолочных швов, уменьшает пылегазовыделение, а также позволяет сваривать тонкий металл. Качество шва определяется чистотой защитного газа и составом

электродной проволоки. Так, для сварки обычно используют аргон, чистый гелий и азот.

При наличии в азоте кислорода пластичность соединений заметно снижается. Для сварки меди М1 и М2 рекомендуются проволоки БрКМц3-1 и МНЖКТ, которые обеспечивают получение плотного шва без трещин. Механические свойства сварных соединений близки к свойствам основного металла. Коррозионная стойкость металла шва, выполненного проволокой МНЖКТ, такая же, как и основного металла, а проволокой БрКМц3-1 — немного ниже. Сварку жестких соединений рекомендуется выполнять проволокой МНЖКТ.

Сварка латуни сопряжена с трудностями из-за интенсивного утара цинка. Особенно интенсивно испаряется цинк из электрода. Введением цинка в проволоку не удастся существенно повысить его содержание в шве. Латунь обычно сваривают в аргоне или гелии бронзовыми проволоками БрКМц3-1 или БрАМц9-2.

В целях уменьшения выгорания цинка рекомендуется вести сварку на пониженных напряжениях и токах, а также импульсной дугой. Для повышения содержания цинка в шве рекомендуется сваривать соединения без разделки кромок за один проход. Поскольку теплопроводность латуни ниже, чем меди, металл толщиной до 20 мм сваривают без подогрева. Швы, выполненные проволокой БрАМц9-2, — плотные, без трещин и других дефектов. При сварке проволокой БрКМц3-1 жестких соединений в металле шва встречаются трещины. Применение импульсно-дуговой сварки уменьшает потери элементов и пылегазовыделение, позволяет сваривать латунь в вертикальном, горизонтальном и потолочном положениях. В околошовной зоне наблюдается рост зерен. Механические свойства сварного соединения удовлетворительные.

Сварку латуни с медью выполняют в аргоне, гелии или азоте проволоками БрКМц3-1, БрАМц9-2 или МНЖКТ. При толщине медной детали более 4 мм ее подогревают до температуры 200 °С. Режимы сварки выбирают по толщине медной детали, но сварку ведут на пониженных напряжениях и электрод смещают в сторону меди. Применение импульсно-дуговой сварки позволяет сваривать вертикальные и потолочные швы, при этом исключены подплавление медных труб малых толщин и разбрызгивание.

Сварка алюминиевых бронз марок БрАМц9-2, БрАЖМцЮ3-1,5 и других успешно выполняется в аргоне и гелии проволоками БрАМц9-2 и БрАЖМцЮ3-1,5. Для получения плотных швов с хорошим формированием следует тщательно очищать проволоку

и кромки, а также обеспечивать хорошую защиту зоны сварки газом. Металл толщиной более 12 мм необходимо подогревать до 150...300 °С. Химический состав металла шва при использовании проволоки идентичного состава близок к свариваемому; швы плотные, без трещин.

Бронзы марки БрКМц3-1 успешно сваривают в аргоне, гелии и азоте с использованием проволоки БрКМц3-1 диаметром 0,8...4,0 мм. Сварку выполняют стационарной и импульсной дугой.

Сварка оловянных бронз сопряжена с некоторыми трудностями вследствие склонности к образованию трещин в околошовной зоне. Для предупреждения образования трещин необходимо уменьшить протяженность околошовной зоны или сделать ее более широкой, обеспечив плавное изменение температур. Сварку нежестких соединений толщиной до 10 мм выполняют без подогрева. В этом случае необходимо обеспечить минимальный разогрев деталей и минимальные напряжения в соединении. Более толстый металл сваривают с местным или общим подогревом до 300...350 °С. Оловянные бронзы сваривают в аргоне, гелии, азоте и без защиты газом. Для сварки бронз, не содержащих свинец, рекомендуется проволока из фосфористой бронзы с 4,5...7,5 % Sn. Для заварки дефектов на бронзах, содержащих свинец, используют порошковую проволоку близкого состава.

Кремнистая и алюминиевая бронзы хорошо свариваются с медью. Сварку ведут проволоками БрКМц3-3 и БрАМц9-2 в аргоне, гелии или азоте. Для хорошего сплавления с медной кромкой дугу направляют на медь, а при толщине меди более 5 мм соединение подогревают. Режимы сварки выбирают исходя из толщины меди. Алюминиевые бронзы хорошо свариваются также со сталью. Сварку выполняют проволокой БрАМц9-2 в аргоне. Режимы сварки выбирают такими же, как при сварке бронз. Многослойные швы сваривают с полным остыванием слоев.

Сварка медно-никелевых сплавов сопряжена с опасностью образования трещин и пор. Сварку сплавов с содержанием до 5 % Ni можно выполнять в аргоне, гелии и азоте с использованием проволок сходного состава, дополнительно легированных раскислителями. Сплав МНЖ5-1 сваривают проволокой МНЖКТ или проволокой, содержащей 5...6 % Ni, а также марганец и титан. Если проволока не содержит раскислителей, то в металле шва образуются поры. Сварку ведут без подогрева деталей. Режимы сварки выбирают такими же, как при сварке латуни.

Процесс сварки проволокой МНЖКТ в аргоне протекает стабильно, без разбрызгивания, а в азоте — сопровождается уси-

ленным разбрызгиванием. При сварке проволоками МНЖКТ диаметром до 1,4 мм швы плотные, без трещин. При больших диаметрах электрода в кратерах возможны надрывы.

## 5.7. СВАРКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Сварка никеля и его сплавов затруднена вследствие особых физико-химических свойств, а также большой чувствительности к примесям, в первую очередь, к растворенным газам. Растворимость газов  $O_2$ ,  $H_2$  и  $CO$  в расплавленном никеле значительна, при остывании ограничена, что вызывает пористость металла шва, а также водородную болезнь. В связи с этим к числу главных задач, возникающих при сварке плавлением никеля, относятся обеспечение надежной защиты зоны сварки от газов атмосферы, применение сварочных материалов высокой чистоты, а также раскисление и дегазация сварочной ванны. В качестве наиболее эффективных раскислителей для никеля применяют алюминий и титан.

Затруднения при сварке никеля обусловлены также большой склонностью металла шва к образованию кристаллизационных трещин. Значительное влияние на свойства никеля и возникновение трещин в металле шва оказывают сера и фосфор, с которыми никель имеет большое химическое родство. Для снижения роста кристаллитов шва сварку ведут на ограниченной погонной энергии, а в металл шва вводят модификаторы (титан, молибден, алюминий и др.).

При сварке никеля следует учитывать также то, что металл обладает сравнительно низкими литейными свойствами. Металл в сварочной ванне менее жидкотекучий, чем при сварке стали, основной металл проплавляется на меньшую глубину, поэтому немного увеличивают угол разделки кромок и уменьшают притупление.

При сварке никеля и его сплавов принимают специальные меры, чтобы химический состав металла шва отличался от состава основного металла. Это обусловлено тем, что получить качественный шов на этих металлах, особенно на техническом никеле, можно лишь при условии его комплексного легирования.

Зона термического влияния на никеле и его сплавах с медью не закаливается и не имеет таких дефектов, для предотвращения которых потребовался бы предварительный подогрев или последующая термическая обработка. Однако для некоторых сплавов (никеля с молибденом, никеля с молибденом и хромом и др.) требует-

ся последующая термическая обработка сварных соединений (нагрев до 700...800 °С с последующим охлаждением на воздухе или в воде). Термическая обработка сварных соединений из технического никеля позволяет получить мелкозернистую и дезориентированную структуру, частично или полностью снять сварочные напряжения.

**Подготовка к сварке.** Важным условием получения качественного шва на никеле и его сплавах является обеспечение чистоты свариваемого металла и сварочной проволоки. Кромки и прилегающие к ним участки металла на расстоянии 20...30 мм тщательно зачищают механическим способом до металлического блеска и обезжиривают ацетоном или чистым бензином. При длительном хранении никеля и медно-никелевых сплавов в заводской атмосфере на них образуется налет, содержащий серу. Этот налет не снимается при обезжиривании, поэтому требуется обязательная механическая зачистка перед сваркой.

Как правило, химическое травление кромок на никеле и его сплавах перед сваркой не требуется. Однако в ряде случаев при наличии пленки оксидов на поверхности технического никеля, сохранившейся после длительного высокотемпературного нагрева, рекомендуется обработка металла в травильном растворе следующего. Перед травлением деталь промывают в горячей воде, затем погружают в травильную ванну, а после травления вновь промывают в горячей воде. Длительность травления детали в ванне составляет примерно 5...10 с. После травления и промывки остатки кислот нейтрализуют в 1%-ном водном растворе аммиака и деталь просушивают в кипящей воде.

**Электродуговая сварка покрытыми электродами.** Эта сварка выполняется в основном для соединения металла толщиной более 1,5 мм электродами с качественными покрытиями на постоянном токе обратной полярности. Основной трудностью при сварке никеля покрытыми электродами является образование пор в сварных швах. Главная причина пористости — азот воздуха, проникающий в зону сварки в результате недостаточной защиты. Для создания надежной защиты в состав покрытия необходимо вводить газообразующие компоненты. Наиболее приемлемы для сварки никеля карбонаты, количество которых должно быть не менее 45 % массы сухой шихты покрытия. Совместно с карбонатами в покрытии необходим углерод или его соединения с металлами, которые способствуют изменению состава защитной газовой атмосферы.

Для сварки никеля выпускаются электроды марки ОЗЛ-32 с рутилофтористокarbonатным покрытием. Пермским политехни-

ческим институтом разработаны новые электроды марок ЭНР-1, ЭНС-1, ЭНС-3.

При сварке никеля используют пониженный ток в целях предупреждения перегрева электрода и получения минимально возможных внутренних напряжений в шве. При этом достигается также снижение утара раскисляющих и стабилизирующих элементов, содержащихся в электродной проволоке. Сварка выполняется при короткой дуге и небольшой скорости — примерно на 15 % меньше скорости сварки стали (7...9 м/ч). Сварку следует по возможности вести в нижнем положении. Однако некоторые электроды, например «Прогресс-50», ОЗЛ-32, позволяют производить сварку в вертикальном и потолочном положениях.

Незначительные продольные колебания конца электрода обеспечивают хорошее газоудаление и получение более плотного шва, чем при поперечных колебаниях. Электрод стараются держать перпендикулярно плоскости шва с наклоном не более 15° в сторону свариваемых кромок.

При сварке пластин из никеля и его сплавов больших толщин (более 15 мм) рекомендуется предварительный подогрев кромок до 200...250 °С, что обеспечивает лучшие формирование и плотность шва при многослойной сварке. Никель и его сплавы толщиной до 3...4 мм сваривают без разделки кромок. В зависимости от типа соединения и толщины свариваемого никеля кромки рекомендуется подготавливать механическим способом (пневматическим зубилом, на строгальных или фрезерных станках). Подготовленные кромки и поверхность листов на ширину 30...40 мм в сторону от шва необходимо очищать от оксидной пленки, следов коррозии, масла и грязи до металлического блеска. Рекомендуется вести сварку по возможности за один проход. При больших толщинах в случае применения многопроходной сварки необходима хорошая очистка поверхности промежуточных слоев. Для уменьшения деформаций длинные швы рекомендуется выполнять участками с небольшими разрывами, которые завариваются после очистки от шлака.

**Сварка в среде защитных газов.** В настоящее время этот способ является основным для сварки никеля и его сплавов. Задача обеспечения требуемого качества швов при сварке в среде аргона неплавящимся электродом решается путем выбора присадочных проволок, содержащих раскислители и нитридообразующие элементы (например, НМц2,5, НМц5). В последние годы разработаны специальные комплексно-легированные проволоки марок НМцАТЗ-1,5-0,6 и НМцАТК-1-1,5-2,5-0,15. Эти проволоки наиболее надежно обеспечивают получение шва без пор и трещин.

Дуговую сварку неплавящимся электродом выполняют на постоянном токе прямой полярности с применением аргона первого сорта. Для получения качественного шва необходимы тщательная зачистка свариваемых кромок и прилегающих к ним участков металла на расстояние 20...30 мм, обезжиривание кромок и присадочных материалов, защита аргоном обратной стороны шва, применение газовых сопел специальной конструкции, как при сварке титана.

Сварка никеля производится при минимально возможной длине дуги и повышенной силе тока. Сварочный ток выбирается из расчета 40...50 А на 1 мм толщины основного металла, напряжение дуги — 10...12 В. При ручной сварке никеля следует применять «левый» способ при максимально возможной скорости процесса с минимальными поперечными колебаниями электрода. Рекомендуемый угол наклона горелки к оси шва — не более 60°, а вылет неплавящегося электрода — 12...15 мм. Присадочный металл следует подавать под углом 20...30° к оси шва. При многопроходной сварке последующие швы накладывают после полного охлаждения, зачистки от шлака и обезжиривания предыдущих слоев. Швы, подвергающиеся воздействию агрессивных сред, выполняют в последнюю очередь. Швы на никеле, выполненные в среде аргона, характеризуются высокой прочностью при хороших значениях пластичности и вязкости.

При аргонодуговой сварке сплавов на основе никеля большое значение имеет правильный выбор состава присадочного материала.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие специфические свойства меди обуславливают трудности при ее сварке?
2. В чем заключается подготовка деталей и присадочной проволоки перед сваркой?
3. В каких защитных газах или их смесях производят сварку меди?
4. В чем заключаются трудности при сварке алюминия и его сплавов?
5. Каким образом производят подготовку деталей из алюминиевых сплавов под сварку?
6. Какими способами сварки можно получать соединения алюминиевых сплавов?
7. В чем заключаются особенности сварки титановых сплавов?
8. Какие способы сварки применяют для соединения деталей из магниевых сплавов?

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

## 6.1. ОБОРУДОВАНИЕ ПОСТА ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В зависимости от характера выполняемой работы и габаритных размеров свариваемых конструкций сварочный пост располагается в специальных сварочных кабинах или непосредственно на изделии.

Сварочные кабины размером 2 000 × 2 000 или 2 000 × 3 000 мм используют при сварке небольших изделий. Стены кабин изготавливают из несгораемых материалов и окрашивают огнестойкой краской, поглощающей ультрафиолетовые лучи. Стены имеют высоту 1 800...2 000 мм, а для лучшей вентиляции они подняты над полом на 200...300 мм. Дверной проем в кабине закрывают брезентом, пропитанным огнестойким составом. Пол настилают из огнеупорного материала — кирпича или бетона. Кабины должны освещаться естественным или искусственным светом (80...100 лк),

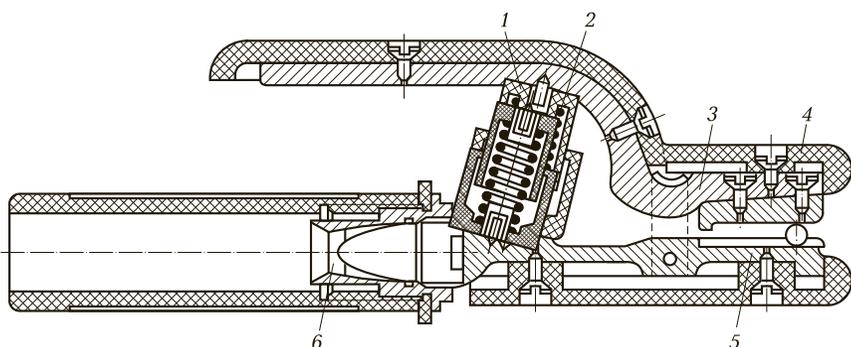


Рис. 6.1. Электрододержатель серии ЭП:

- 1 — защитный колпачок пружины; 2 — пружина; 3 — рычаг с верхней губкой; 4 — теплоизоляционная защита; 5 — нижняя губка; 6 — конус резьбовой втулки

иметь вентиляцию (воздухообмен 40 м<sup>3</sup>/ч) и местные отсосы, поглощающие газы и пары из зоны сварки.

Внутри кабины устанавливают металлический сварочный стол высотой 500...600 мм для работы сидя или высотой около 900 мм для работы стоя (площадь стола — около 1 м<sup>2</sup>) со стальными болтами для крепления токоподводящего провода от источника сварочного тока и для провода заземления стола. С боковой стороны стола имеются гнезда для хранения электродов или присадочной проволоки.

Источники питания дуги могут быть однопостовыми или многопостовыми. На рабочем месте обычно размещают однопостовые источники. При питании сварочных постов от многопостовых источников сварочный ток разводят по кабинам с помощью

**Таблица 6.1. Технические характеристики электрододержателей для ручной электродуговой сварки плавящимся электродом**

Параметр	Электрододержатель						
	ЭП-2	ЭП-3	ЭД-125-1	ЭД-300-1	ЭД-500-1	ЭУ-300	ЭУ-500
Допустимая сила сварочного тока, А	250	500	125	300	500	315	500
Диаметр металлического стержня электрода, мм	Не более 5	6...8	1,6...3,0	2...6	4...10	3...6	5...8
Площадь сечения сварочного кабеля, мм <sup>2</sup> , подсоединенного к держателю	50	70	25	50	70	50	70
Габаритные размеры, мм:							
длина	250	325	250	266	293	198	198
ширина	40	37	32	36	40	42	42
высота	80	95	74	84	92	80	80
Масса, кг	0,43	0,80	0,32	0,48	0,67	0,40	0,42

токоподводящих проводов или шин. В кабине устанавливают рубильник или магнитный пускатель для включения сварочного тока.

При выполнении сварочных работ сварщику требуется определенный набор инструментов и принадлежностей.

Электрододержатель (ГОСТ 14651—78) должен быть легким (массой не более 0,5 кг), с надежной изоляцией, не нагревающимся при работе и обеспечивающим быстрое и надежное закрепление электрода (рис. 6.1). В зависимости от способа крепления электродов различают пассатижные (ЭП и ЭД), винтовые, эксцентриковые (ЭУ и ЭДС) и другие виды электрододержателей (табл. 6.1).

Щитки и шлемы изготавливают в соответствии с ГОСТ 12.4.035—78 из токонепроводящих материалов — фибры или пластмассы (табл. 6.2). Масса щитка не превышает 0,48 кг, шлема — 0,60 кг. Они имеют гладкую матовую внутреннюю поверхность черного цвета. Щиток состоит из корпуса со смотровым окном и ручки, имеющей круглое поперечное сечение и длину не менее 120 мм. Шлем представляет собой защитное приспособление, надеваемое сварщиком на голову и обеспечивающее два фиксированных положения корпуса: опущенное (рабочее) и откинутое назад.

**Таблица 6.2. Защитные щитки и шлемы электросварщика**

Модификация	Наименование	Модель	Размеры светофильтра, мм
1	Наголовный щиток с непрозрачным корпусом	НН-Э-30У1	52 × 102
2	То же	ННО-Э-30У1	90 × 102
3	Ручной щиток с непрозрачным корпусом	РН-Э-30У1	52 × 102
4	Наголовный щиток с непрозрачным корпусом	ЩЭК-Э-30У1	52 × 102
5	Наголовный щиток, монтируемый на защитной каске, с открывающимся светофильтром и подвижной рамкой	НН-Э-30У1	52 × 102
6	Ручной щиток с непрозрачным корпусом	РНО-Э-30У1	90 × 102

**Таблица 6.3. Светофильтры для защиты глаз от излучения дуги (ГОСТ 12.4080–79)**

Обозначение	Сила сварочного тока, А	Обозначение	Сила сварочного тока, А
С-3	15...30	С-6	150...275
С-4	30...60	С-7	275...350
С-5	50...150	С-8	350...600

Для защиты глаз от вредного излучения щитки и шлемы снабжены светофильтрами типа «С» темно-зеленого цвета, которые выпускают вместо светофильтров типа «Э». Они подразделяются на 13 классов для сварочного тока силой 15...600 А (табл. 6.3). В настоящее время для защиты глаз сварщика применяются светофильтры на жидких кристаллах типа «хамелеон».

Защита светофильтра от брызг металла обеспечивается прозрачными органическими стеклами, которые при повреждении заменяют новыми.

Сварочные провода марки КРПТ позволяют подвести ток от силовой сети к сварочным аппаратам.

От сварочных аппаратов к рабочим местам сварочный ток поступает по гибкому проводу марки ПРГ, АПР или ПРГД с резиновой изоляцией, длина которого не превышает 40 м. К электродо-

**Таблица 6.4. Площадь сечения сварочных проводов в зависимости от силы сварочного тока**

Допустимая сила тока, А	Площадь сечения проводов, мм <sup>2</sup>	
	одинарного	двойного
100	16	—
200	25	2×10
300	50	2×16
400	70	2×25
600	95	2×35
800	—	2×50
1 000	—	2×70

держателю подключают гибкий медный провод марки ПРГД длиной не менее 3 м. В табл. 6.4 приведены данные по выбору сечения гибких сварочных проводов. Температура их нагрева не должна превышать 70 °С.

Сварочные провода соединяют специальными муфтами, медными наконечниками и болтами. Проводящий провод впаивают высокотемпературным припоем или закрепляют механически.

Одежда сварщика (куртка, брюки и рукавицы) должна быть изготовлена из кожи, брезента, сукна или асбестовой ткани. Рукавицы могут быть брезентовыми или спилковыми.

Дополнительный инструмент сварщика: стальные щетки (ручные или с электроприводом) для зачистки кромок перед сваркой и удаления с поверхности швов шлака и молоток-шлакоотделитель.

## 6.2. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Источники питания для дуговой сварки являются основным инструментом сварочного оборудования, обеспечивающим зажигание и гашение дуги, ее стабильное горение, управление физическими параметрами и технологическими свойствами. Выбор источника питания для дуговой сварки, требования к его проектированию и производству зависят от ряда факторов: физических характеристик самой дуги (выступающей в качестве нагрузки в электрической цепи), особенностей конкретного способа сварки и свариваемого материала, требований к качеству сварного соединения и условий выполнения сварки. Первым и определяющим условием функционирования любого источника питания являются электрические характеристики дуги.

Статическая вольт-амперная характеристика (СВАХ) (см. рис. 2.6) дуги представляет собой зависимость напряжения дуги от силы ее тока  $I_A$ . Ее строят по экспериментальным данным при плавном изменении тока и сохранении неизменными физических условий ее горения. На графике выделяют три области, которые отвечают падающей 1, жесткой 2 и возрастающей 3 СВАХ.

В маломощных дугах при ручной сварке покрытым электродом наблюдается падающая характеристика (область 1). При дальнейшем росте тока пропорционально увеличивается площадь столба

дуги, поэтому характеристика в области 2 жесткая. Она наблюдается при сварке покрытым электродом и механизированной сварке под флюсом. При механизированной сварке под флюсом дуга может иметь и возрастающую характеристику, как при сварке в углекислом газе (область 3). Граница между областями 1 и 2 при различных способах и условиях дуговой сварки приходится приблизительно на силу тока 5...20 А. Поскольку положение границы между областями 2 и 3 существенно зависит от площади сечения столба дуги (и электрода), то ее правильнее охарактеризовать плотностью тока в электроде; эта граница соответствует 100 А/мм<sup>2</sup>.

Динамические характеристики дуги определяются родом тока, протекающего через нее. В соответствии с этим различают сварочную дугу постоянного тока (полярность электрода и изделия не меняется в процессе сварки), переменного тока (полярность электрода и изделия меняется с частотой, равной частоте переменного тока в промышленной сети, т. е. 50...60 Гц) и импульсные дуги, у которых сила тока периодически меняется либо без изменения полярности электрода и изделия (униполярная пульсация), либо с изменением полярности (биполярная пульсация) с заранее выбранной частотой. При биполярной пульсации сварочная дуга периодически гаснет и зажигается вновь с частотой, в 2 раза превышающей частоту изменения силы сварочного тока (или напряжения на дуге), что ведет к снижению устойчивости ее горения и даже к полному гашению в процессе сварки. В каждом из перечисленных режимов источник питания должен обеспечивать устойчивое горение дуги.

Для решения этой задачи необходимо правильно выбрать внешнюю вольт-амперную характеристику (ВВАХ) источника питания (см. рис. 2.6);  $U_{\text{и}} = f(I_{\text{д}})$ ; ВВАХ источника питания экспериментально определяется путем измерения напряжения  $U_{\text{и}}$  и силы тока  $I_{\text{д}}$  при плавном изменении сопротивления нагрузки  $R_{\text{д}}$  — сопротивления дуги; при этом дуга обычно имитируется линейным активным сопротивлением — балластным реостатом.

В общем случае можно выделить три основных типа ВВАХ современных сварочных источников питания для дуговой сварки: возрастающие 1, жесткие 2 и падающие 3 (рис. 6.2, а); почти всегда ВВАХ нелинейны (рис. 6.2, б).

Ручная сварка производится покрытыми электродами диаметром 2...6 мм при силе тока 50...350 А и напряжении 20...40 В. Зажигание дуги выполняют разрывом цепи короткого замыкания — отдергиванием электрода или «чирканьем» им. Сварка сопровождается значительными колебаниями длины дуги; СВАХ дуги при ручной сварке имеет падающий и жесткий участки (рис. 6.3).

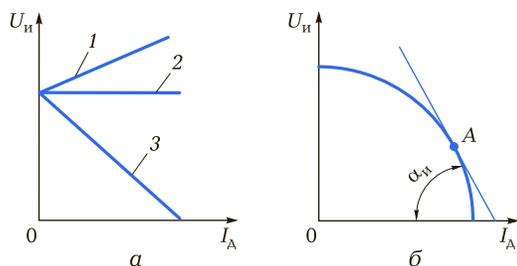


Рис. 6.2. Типичные внешние вольт-амперные характеристики сварочных источников питания:  
*а* — линейные; *б* — нелинейные; 1, 2 и 3 — соответственно возрастающая, жесткая и падающая ВВАХ;  $\alpha_n$  — угол наклона характеристики и оси тока  $I_d$  дуги в точке *A*;  $U_n$  — напряжение источника питания

При ручной сварке ВВАХ должна быть крутопадающей в области рабочих токов (точка *B*), благодаря чему достигается высокая стабильность тока при колебаниях длины дуги. Напряжение холостого хода источника  $U_{x,x}$  выбирают таким образом, чтобы обеспечить высокую надежность начального зажигания дуги. Для малоинерционных источников значение  $U_{x,x}$  должно не менее чем в

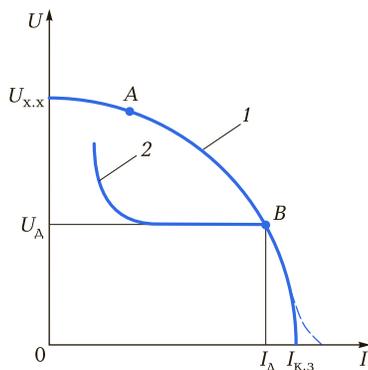


Рис. 6.3. Вольт-амперные характеристики источника питания для ручной дуговой сварки и сварочной дуги:  
 1 — ВВАХ источника питания; 2 — СВАХ сварочной дуги; *A* — нерабочая точка для сварки; *B* — рабочая точка на кривой ВВАХ сварки;  $U_{x,x}$  — напряжение холостого хода источника питания (без электрической нагрузки);  $I_{k,3}$  — сила тока короткого замыкания;  $U_d$ ,  $I_d$  — напряжение и сила тока сварочной дуги

1,5 раза превышать сварочное напряжение  $U_{\Delta}$ . Сила тока короткого замыкания  $I_{к.з}$  при крутопадающей внешней характеристике устанавливается на уровне  $I_{к.з} = (1,2 \dots 2,0)I_{\Delta}$ . Этого, как правило, достаточно для надежного зажигания.

*Сварочные трансформаторы* преобразуют сетевое напряжение (220 и 380 В) в пониженное (менее 140 В), необходимое для сварки. Массово выпускают только однопостовые трансформаторы, предназначенные для ручной дуговой сварки покрытыми электродами. Требования к их конструкции и техническим характеристикам изложены в ГОСТ 7012—77.

Трансформаторы должны обеспечивать легкое зажигание и устойчивое горение дуги при использовании электродов с хорошими стабилизирующими свойствами, специально предназначенных для сварки на переменном токе. Если электроды такими свойствами не обладают (с основным покрытием), то сварочные свойства трансформатора становятся неудовлетворительными, особенно при силе тока менее 100 А. Низкая устойчивость горения дуги переменного тока является недостатком простых сварочных трансформаторов. Другой их недостаток — низкая стабильность режима, обусловленная колебаниями напряжения сети.

Основным достоинством трансформаторов является низкая стоимость их изготовления: они в 2—4 раза дешевле выпрямителей и в 6—10 раз дешевле агрегатов такой же мощности. Трансформаторы имеют высокий коэффициент полезного действия (0,7...0,9) и обеспечивают низкий удельный расход электроэнергии (2...4 кВт·ч на 1 кг расплавленного электродного металла).

Трансформаторы проще и дешевле в эксплуатации, легко поддаются ремонту.

*Сварочные выпрямители* — это основной вид источников питания дуги постоянного тока при различных способах сварки. Наиболее важными элементами силовой части выпрямителя являются понижающий трансформатор и блок выпрямления, выполненный на базе полупроводниковых элементов. По конструктивным особенностям выпрямители подразделяются на две группы в соответствии со схемой управления параметрами:

- выпрямители, управляемые трансформатором: с секционированными обмотками; увеличенным магнитным рассеянием; дросселем насыщения;
- выпрямители, управляемые блоком выпрямления: с тиристорным управлением во вторичной цепи трансформатора; тиристорным управлением в первичной цепи транс-

форматора; транзисторным управлением во вторичной цепи трансформатора.

Для ручной дуговой сварки широко применяются выпрямители, управляемые трансформатором с увеличенным магнитным рассеянием. Это серийные выпрямители ВД-201, ВД-251, ВД-306 УЗ, ВД-307 и ВД-403. В последнее время все большее распространение получают сварочные выпрямители с тиристорным и транзисторным управлением. Силовая схема данного выпрямителя представляет собой неуправляемый сварочный трансформатор в сочетании с управляемым блоком выпрямления из тиристоров или транзисторов. Формирование ВВАХ источника питания осуществляется посредством фазового управления работой блока выпрямления.

### 6.3. УСТАНОВКА ДЛЯ РУЧНОЙ АРГОДУГОВОЙ СВАРКИ

Аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом выполняют на постоянном токе прямой полярности или на переменном токе.

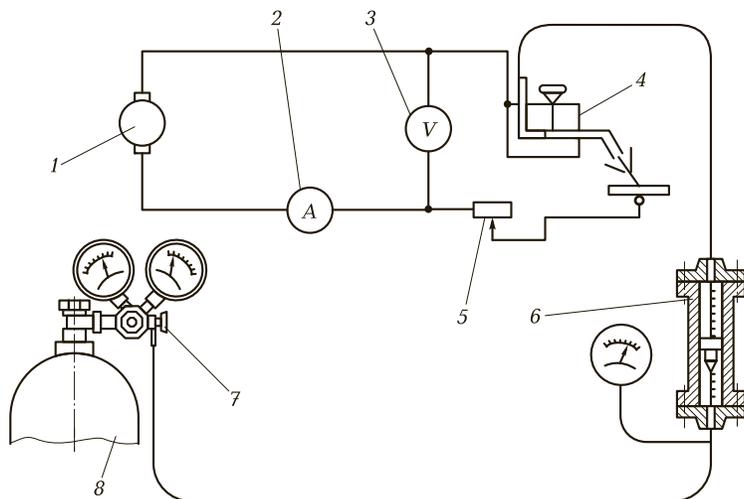


Рис. 6.4. Схема установки для аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом на постоянном токе:

1 — источник питания; 2 — амперметр; 3 — вольтметр; 4 — горелка; 5 — балластный реостат; 6 — расходомер газа; 7 — редуктор; 8 — баллон с газом

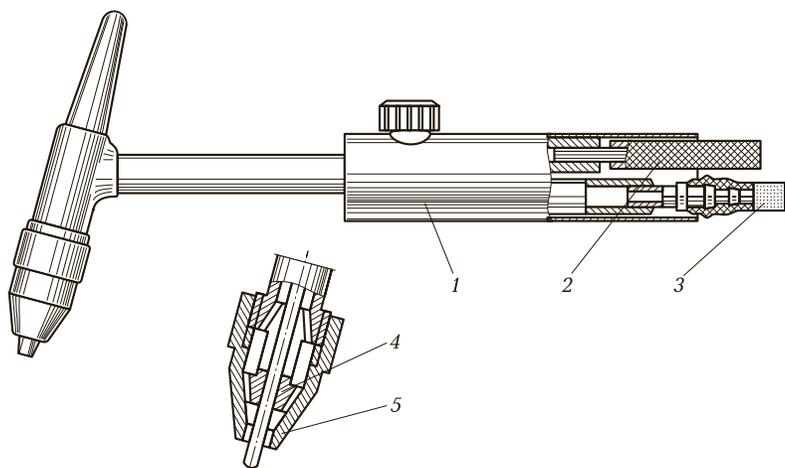


Рис. 6.5. Горелка для аргодуговой сварки неплавящимся электродом:  
 1 — корпус; 2 — токоподвод; 3 — штуцер для подачи защитного газа; 4 — цанга; 5 — сопло

Схема установки для сварки вольфрамовым электродом на постоянном токе показана на рис. 6.4.

В качестве источника питания дуги постоянного тока применяют обычные сварочные генераторы и универсальные выпрямители.

Балластный реостат РБ-200 или РБ-300 подключают в сварочную цепь для регулирования и получения низких значений силы тока (при использовании источника повышенной мощности), а также для обеспечения устойчивости горения дуги.

Горелки предназначены для сварки вольфрамовым электродом в среде защитных газов. Конструкция горелки должна обеспечивать надежное крепление электрода, подведение тока, защитного газа, а в некоторых случаях и охлаждающей среды. Горелка состоит из следующих основных элементов (рис. 6.5.): корпус 1, цанговый зажим 4 электрода, сопло 5, токопровод 2 и газопроводящая трубка с ниппелем или штуцером 3. Горелки комплектуют набором цанг для применения различных по диаметру вольфрамовых электродов. Сопла горелок (сменные с различными диаметрами выходного отверстия) крепятся к корпусу резьбовым соединением. Горелки для сварки на токах свыше 200 А имеют водяное охлаждение.

## 6.4. СХЕМА ПОСТА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Схема поста для полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде защитного газа показана на рис. 6.6.

Среди новых типов полуавтоматов для сварки тонкого металла в нашей стране широко применяют полуавтомат А-547Р, предназначенный для электродуговой сварки металла толщиной до 3 мм и угловых соединений при катетах шва до 4 мм. Сварку можно выполнять во всех пространственных положениях электродной проволокой диаметром 0,8...1,0 мм постоянным током обратной полярности.

В полуавтоматах для дуговой сварки осуществляется механизированная подача сварочной проволоки. Автоматическое поддер-

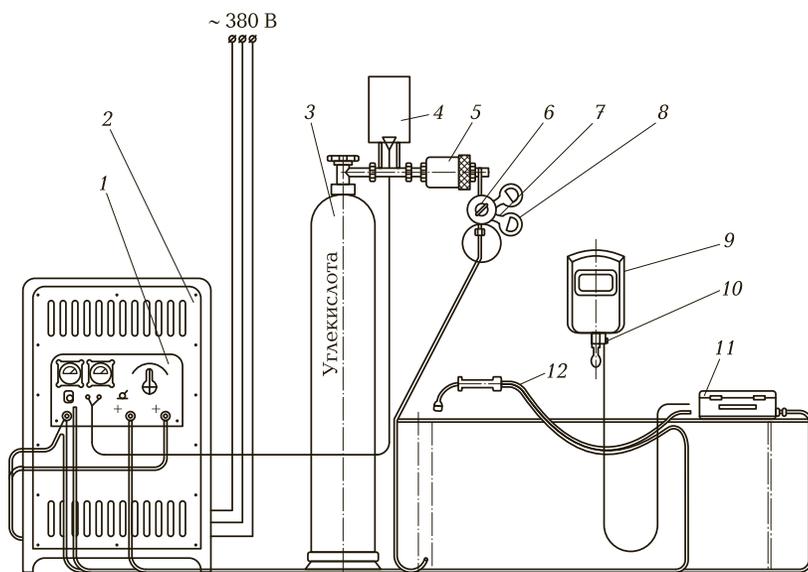


Рис. 6.6. Схема поста А-547Р для полуавтоматической сварки в среде углекислого газа проволокой диаметром 0,8...1,0 мм:  
1 — пульт управления; 2 — источник тока; 3 — баллон с углекислотой; 4 — предредукторный подогреватель газа; 5 — осушитель газа; 6 — редуктор; 7 — переходный штуцер для установки манометра; 8 — манометр; 9 — щиток для защиты от дуги; 10 — кнопка включения; 11 — подающий механизм; 12 — горелка

жание постоянства параметров дуги достигается в основном за счет саморегулирования. Однако известны полуавтоматы и с принудительным регулированием дуги.

Основные элементы полуавтоматов: держатель, гибкие шланги, механизм подачи сварочной проволоки, кассеты со сварочной проволокой и аппаратный шкаф, или шкаф управления. Конструктивные особенности как самих полуавтоматов, так и их отдельных элементов зависят в основном от назначения (специализации) полуавтомата.

Наиболее ответственный элемент полуавтоматов — механизм подачи проволоки. Его компоновка и назначение примерно такие же, как и у головок автоматов для дуговой сварки. Конструктивное оформление механизма подачи во многом зависит от назначения полуавтомата. В полуавтоматах тяжелого типа механизм подачи размещен на передвижной тележке и сосредоточен в массивном корпусе. В полуавтоматах легкого типа механизм подачи установлен в переносном футляре или расположен непосредственно на корпусе держателя.

Сварочные полуавтоматы обеспечивают только механизированную подачу сварочной проволоки, а перемещение дуги вдоль оси шва выполняется вручную.

Классификация полуавтоматов для дуговой сварки проводится по следующим признакам:

- способ защиты сварочной зоны (для сварки под флюсом, в среде защитных газов или открытой дугой);
- вид применяемой проволоки (для сварки сплошной, порошковой или комбинированной проволокой);
- способ подачи проволоки (полуавтоматы толкающего, тянущего или комбинированного типа);
- конструктивное исполнение (со стационарным, передвижным или переносным подающим устройством). Для сварки выпускают полуавтоматы, рассчитанные на номинальную силу тока 150...600 А, проволоку диаметром 0,8...3,5 мм, скорость подачи 1,0...17,0 м/мин.

Механизм подачи проволоки оснащен двигателем переменного или постоянного тока. В первом случае скорость подачи изменяют ступенчато-сменными шестернями, во втором — плавным регулированием частоты вращения двигателя.

Наибольшее распространение получили полуавтоматы толкающего типа, в которых подающий механизм проталкивает проволоку через гибкий шланг к горелке. В полуавтоматах тянущего типа

подающие ролики механизма подачи размещены в горелке; в этом случае проволока протягивается через шланг.

Имеются полуавтоматы с двумя синхронно работающими механизмами подачи, одновременно осуществляющими проталкивание и протягивание проволоки через шланг (тянущее-толкающий тип).

Механизм подачи проволоки диаметром 0,8...1,4 мм рассчитывается из условия получения проталкивающего усилия 100 Н, механизмы для проволок диаметром 1,6...3,5 мм — 200 Н. У большинства отечественных и импортных полуавтоматов применяются двигатели мощностью 40...180 Вт.

Роликовые устройства для подачи электродной проволоки часто содержат два ролика: подающий и прижимной. Для стальной проволоки диаметром 1,6...2,5 мм, а также для порошковой или алюминиевой проволоки применяют две пары приводных и прижимных роликов.

Форма рабочей поверхности роликов может быть цилиндрической гладкой или с накаткой и конической.

Кассеты или кассетные устройства с унифицированными размерами выбирают в зависимости от исполнения полуавтомата. Некоторые полуавтоматы снабжены кассетными устройствами для установки больших мотков.

Горелки для полуавтоматической сварки рассчитаны на работу при силе тока 125; 160; 200; 315; 400; 500 и 630 А. Для сварки в углекислом газе при силе тока менее 500 А выпускают горелки с естественным воздушным охлаждением. Для тяжелых условий работы при силе тока 500 и 630 А, а также для сварки в аргоне при силе тока, превышающей 315 А, предназначены горелки с водяным охлаждением.

По характеру взаимного расположения корпуса и рукоятки различают горелки молоткового и пистолетного типов. Последние часто применяются при использовании мягких проволок и порошковых проволок большого диаметра; они удобны также при сварке в вертикальном положении.

Гибкий шланг в полуавтоматах предназначен для подачи электродной проволоки, сварочного тока, защитного газа. Токоподвод к электродной проволоке обычно осуществляется через трубчатые наконечники.

Включение двигателя может осуществляться двумя способами: нажатием пусковой кнопки или замыканием электродной проволоки на свариваемое изделие.

Конструктивные особенности полуавтоматов заключаются в следующем. В полуавтоматы с плавным регулированием скоро-

сти подачи проволоки входят унифицированные узлы и блоки: электронный блок управления сварочным процессом БУСП-2, редукторный привод подачи проволоки, тормозные устройства и кассеты.

## 6.5. ГАЗОВАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Газовая аппаратура для сварки в защитных газах служит для подготовки, подачи газа и управления подачей газа при сварке. Это газовые редукторы, подогреватели и осушители газов, расходомеры, смесители газов, электромагнитные газовые клапаны и т.д.

*Редукторы* (рис. 6.7) предназначены для понижения давления газа, поступающего из баллона или распределительного трубопровода, и автоматического поддержания постоянным заданного рабочего давления.

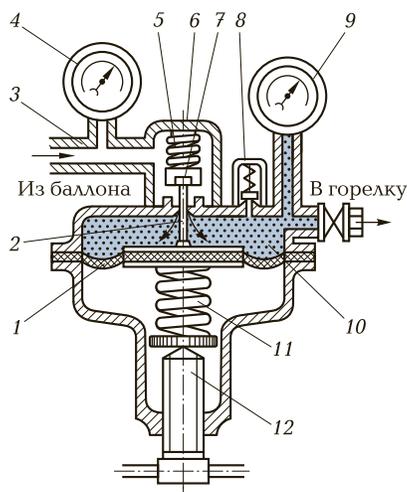


Рис. 6.7. Схема редуктора:

1 — мембрана; 2 — передаточный диск со штифтами; 3 — штуцер впуска газа; 4 — манометр высокого давления; 5 — вспомогательная пружина; 6 — камера высокого давления; 7 — редукционный клапан; 8 — предохранительный клапан; 9 — манометр низкого (рабочего) давления; 10 — камера низкого давления; 11 — главная зажимная пружина; 12 — регулирующий винт

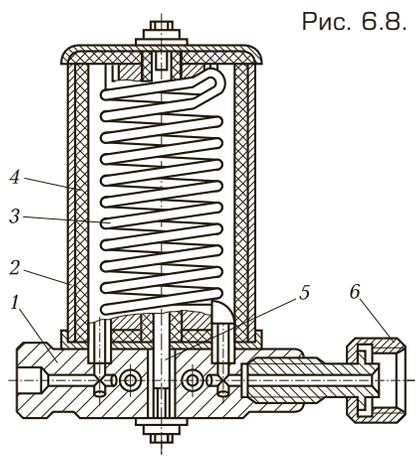


Рис. 6.8. Подогреватель углекислого газа:  
 1 — корпус; 2 — кожух; 3 — змеевик;  
 4 — теплоизоляционный слой; 5 — на-  
 гривательный элемент; 6 — накидная  
 гайка

При сварке в аргоне применяют редукторы АР-10, АР-40 или АР-150. При сварке в углекислом газе или его смесях используют редукторы обратного действия, одновременно являющиеся расходомерами (У-30 и ДЗД-1-59М). Возможно применение также обычных кислородных редукторов, например РК-53, РКД-8-61.

*Подогреватели* (рис. 6.8) предназначены для предотвращения замерзания редуктора при большом расходе углекислого газа, поступающего в него из баллона. Подогреватель крепят к балло-

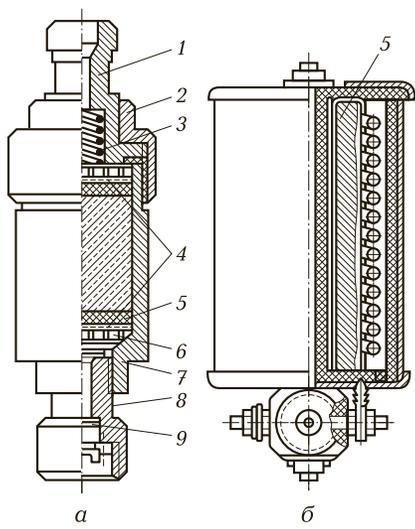


Рис. 6.9. Осушители углекислого  
 газа высокого (а)  
 и низкого (б) давления:  
 1 — втулка; 2 — накидная гайка; 3 —  
 пружина; 4, 9 — сетки; 5 — фильтр;  
 6 — сетчатая шайба; 7 — корпус; 8 —  
 штуцер

ну накидной гайкой. Питание осуществляется постоянным током напряжением 20 В или переменным током напряжением 36 В.

Осушители высокого давления устанавливают перед понижающим редуктором. Осушители низкого давления применяют при централизованной газовой разводке. В качестве поглотителя влаги используют силикагель или алюмогликоль, реже — медный купорос и хлористый кальций. Силикагель и медный купорос, насыщенный влагой, прокачивают при температуре 250...300 °С в течение 1 ч. Осушитель рассчитан на осушку 30...33 м<sup>3</sup> углекислого газа одной зарядки (рис. 6.9).

Расходомеры предназначены для измерения расхода защитного газа. Они могут быть поплавкового (ротаметр) и дроссельного типа. Газовый ротаметр (рис. 6.10) состоит из стеклянной трубки, в которой находится легкий поплавок. Чем больше расход газа и его плотность, тем выше поднимается поплавок. Ротаметр снабжен шкалой, тарированной по расходу воздуха. Для пересчета на расход защитного газа пользуются графиками.

Действие расходомера дроссельного типа основано на принципе измерения перепада давления на участках перед дросселирующей диафрагмой и за ней, которое зависит от расхода газа и измеряется манометрами. Этот принцип использован в редукторе У-30, в котором манометр показывает расход газа, а не давление в рабочей камере.

Смесители предназначены для получения смесей газов CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>

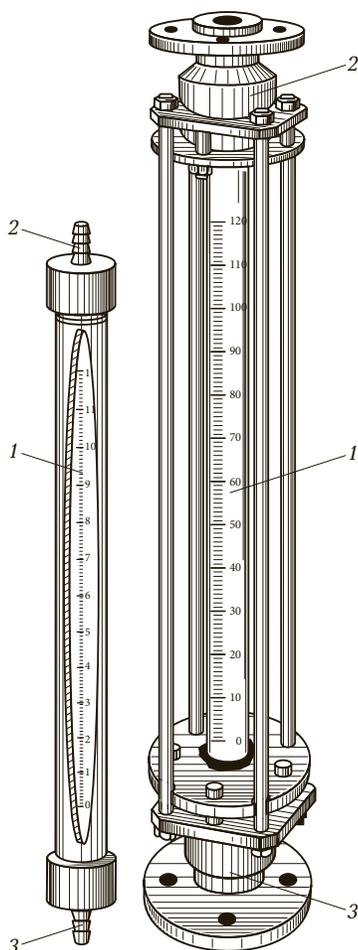


Рис. 6.10. Ротаметры (расходомеры): а — РС-3; б — РС-5; 1 — шкала; 2, 3 — штуцер

+ Ar + O<sub>2</sub>. Постовой смеситель УКП-1-71, предназначенный для получения смеси газов CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>, отбираемых из баллонов, и автоматического поддержания заданного состава и расхода газовой смеси, состоит из регулятора давления с редуктором ДКП-1-65 и узла смешения газов. Состав смеси варьируют заменой дюз. Рамповый смеситель УКР-1-72 позволяет получить смесь CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> при отборе кислорода из рампы баллонов, а углекислого газа — из изотермической емкости, содержащей сжиженный переохлажденный диоксид углерода. Смеситель обеспечивает питание газом 10—50 сварочных постов.

Газовый клапан используют для экономии защитного газа. Его устанавливают по возможности ближе к сварочной горелке, включают до зажигания дуги и выключают после обрыва дуги и полного затвердевания металла в кратере шва. Наибольшее распространение получили электромагнитные газовые клапаны.

## 6.6. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Источники питания для дуговой сварки являются основным элементом сварочного оборудования, обеспечивающим зажигание и гашение дуги, ее стабильное горение, управление ее физическими параметрами и технологическими свойствами. Выбор источника питания для дуговой сварки, требования к его проектированию и производству зависят от следующих факторов: физические характеристики самой дуги (выступающей в качестве нагрузки в электрической цепи), особенности конкретного способа сварки и свариваемого материала, требования к качеству сварного соединения и условия выполнения сварки. Первым и определяющим условием функционирования любого источника питания являются электрические характеристики дуги.

Статическая вольт-амперная характеристика дуги представляет собой зависимость напряжения дуги  $U_A$  от силы ее тока  $I_A$ . Ее строят по экспериментальным данным при плавном изменении тока и сохранении неизменными физических условий ее горения. На графике выделяют три области, которые отвечают падающей I, жесткой II и возрастающей III СВАЗ (рис. 2.6).

В маломощных дугах при сварке неплавящимся электродом наблюдается падающая характеристика. При дальнейшем росте тока пропорционально увеличивается площадь столба дуги, поэто-

му характеристика в данной области жесткая. Она наблюдается при сварке покрытым электродом и механизированной сварке под флюсом. При механизированной сварке под флюсом дуга может иметь и возрастающую характеристику, как при сварке в углекислом газе.

Сварочная дуга вместе с источником питания образует динамичную систему, которую дополняют устройством подачи электрода в зону сварки средствами ионизации дугового промежутка и защиты шва. В простейшем случае подачу электрода в зону сварки осуществляют вручную. В ходе технологического процесса эта система подвергается воздействию следующих возмущающих факторов: изменение длины дуги, колебание напряжения, скорость подачи электрода, переход капель расплавленного металла с электрода на изделие. Таким образом, постоянно возникают резкие изменения режима и переходные процессы, нарушающие равновесное состояние. Между тем не только нарушение устойчивости, но и относительно кратковременные отклонения режима приводят к нарушению процесса. Из этого следует, что для обеспечения качества сварки система должна обладать устойчивостью, под которой понимают ее способность возвращаться в исходное состояние равновесия при воздействии возмущающих факторов.

**Сварочные выпрямители.** Устройства, предназначенные для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямленный) ток, — сварочные выпрямители — состоят из следующих основных узлов: силовой трансформатор для понижения напряжения сети до необходимого напряжения холостого хода источника; блок полупроводниковых элементов, выпрямляющих переменный ток стабилизирующего дросселя в целях уменьшения пульсаций выпрямленного тока. Выпрямительный блок представляет собой набор полупроводниковых элементов, включенных по определенной схеме. Особенность полупроводниковых элементов заключается в том, что они обладают вентильным эффектом — пропусканием тока в одном направлении; в результате ток получается постоянным (выпрямленным). Полупроводники подразделяются на неуправляемые (диоды) и управляемые (тиристоры) (рис. 6.11).

В качестве материала для кремниевого неуправляемого вентиля-диода (рис. 6.11, *а*) применяют тонкую кремниевую пластинку (катод), на одну сторону которой нанесен слой алюминия (анод). При контактировании двух полупроводников в месте контакта образуется переходный слой *II*, легко пропускающий электрический ток в одном направлении (от анода А к катоду К) и почти не

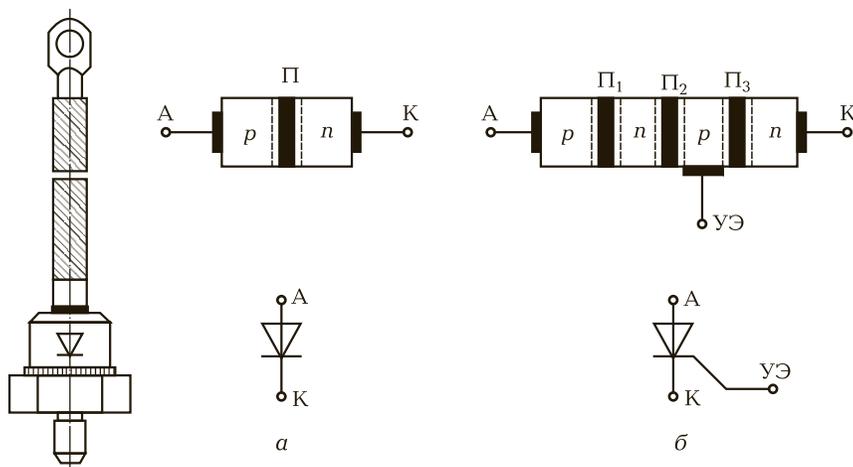


Рис. 6.11. Схема диода (а) и тиристора (б):

А — аноды; К — катоды; П — переходный слой; УЭ — управляющий электрод;  $\Pi_1 \dots \Pi_3$  —  $p-n$ -переход

пропускающий его в обратном направлении. Такой кремниевый диск с переходным слоем впаивают в неразборный герметичный корпус диода, который имеет шпильку на одном конце для ввинчивания в охлаждающий корпус, а на другом конце — вывод в виде гибкого провода.

Кремниевый управляемый вентиль-тиристор имеет четыре слоя и три перехода (рис. 6.11, б). Если к такому элементу приложить внешнее напряжение от анода к катоду, то средний переход  $\Pi_2$  называется включенным в обратном направлении и тиристор ток не пропускает. Если на его управляющий электрод (УЭ) подать положительный потенциал (импульс), то переход  $\Pi_2$  открывается и ток идет по тиристорному элементу от анода к катоду. Тиристор запирается лишь при снижении протекающего по нему тока до нуля. Изменяя по фазе электрический угол открывания тиристора, т. е. время подачи импульса относительно синусоиды питающего напряжения, можно регулировать среднее значение выпрямленного тока. Таким образом, тиристор будет выполнять функции не только выпрямителя, но и регулятора сварочного тока. Конструктивно кремниевый тиристор выполнен так же, как и кремниевый диод, но имеет еще третий (управляющий) электрод. Широкое распространение получили кремниевые и селеновые диоды и кремниевые тиристоры.

На рис. 6.12 показана схема выпрямления однофазного переменного тока. Она состоит из силового однофазного трансформатора и четырех диодов, включенных по мостовой схеме. При таком варианте получают непрерывный выпрямленный пульсирующий ток с падением его до нуля после каждого полупериода. В сварочных выпрямителях применяют трехфазный силовой трансформатор, что обеспечивает равномерную загрузку трехфазной сети и позволяет получать меньшие пульсации выпрямленного тока. В этом случае диоды соединяют по трехфазной мостовой схеме двухполупериодного выпрямления. В каждом плече моста установлены вентили. Диоды в плечах каждой фазы соединены последовательно. Катоды в трех плечах соединены между собой в катодную группу выпрямителя, аноды объединены в анодную группу.

Выпрямители для ручной дуговой сварки изготавливают на номинальные значения сварочного тока от 125 до 500 А при номинальном рабочем напряжении от 25 до 40 В.

Сварочный выпрямитель ВД-306УЗ предназначен для питания сварочной дуги постоянным током от сети трехфазного переменного тока при ручной дуговой сварке, наплавке и резке металлов. Он состоит из трехфазного сварочного трансформатора с подвижной первичной обмоткой, выпрямительного кремниевого блока с вентилятором, пусковой и защитной аппаратуры. Все составляющие части выпрямителя смонтированы на тележке и защищены кожухом из листового металла. Выпрямитель имеет два диа-

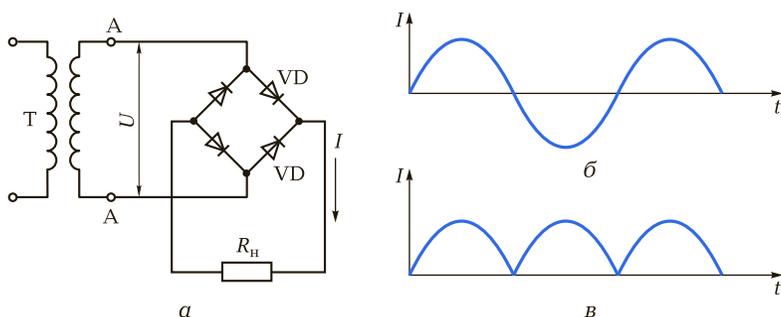


Рис. 6.12. Схема выпрямления однофазного переменного тока (а), формы токов внешней цепи (б) и выпрямленного тока (в): Т — трансформатор; А, Б — плечи диодного моста; VD — диоды;  $R_{н}$  — нагрузочное сопротивление;  $U$  — напряжение в цепи;  $I$  — ток в цепи

пазона регулирования сварочных токов. Внутри каждого диапазона плавное регулирование сварочного тока производится изменением расстояния между обмотками сварочного трансформатора. Внешние характеристики выпрямителя являются крутопадающими.

Сварочный выпрямитель ВДГ-601 предназначен для однопостовой сварки в среде углекислого газа. Выпрямитель включает в себя силовой трансформатор, выпрямительный блок на шести тиристорах, дроссель в сварочной цепи, блок управления тиристорами, блок управления сварочным полуавтоматом, подогреватель газа, пускорегулирующую и защитную аппаратуру. Силовой трансформатор — стержневого типа, трехфазный, с нормальным магнитным рассеянием. Первичная и вторичная обмотки расположены концентрично на стержнях магнитопровода. Плавное регулирование сварочного напряжения осуществляется резисторами, расположенными на блоке управления (местное управление), или с пульта управления полуавтоматом (дистанционное управление). Выпрямитель имеет жесткую внешнюю вольт-амперную характеристику.

Сварочные выпрямители типов ВСВУ и ВСП относятся к тиристорным выпрямителям. Тиристорный выпрямительный блок можно использовать в качестве регулятора силы тока. За счет управляющих импульсов, подаваемых на тиристорный блок, формируют вольт-амперную характеристику выпрямителя и настраивают его на заданный режим непрерывной или импульсной дуговой сварки.

Принципиальная электрическая схема источников этого типа показана на рис. 6.13, а. Трехфазный силовой трансформатор имеет одну первичную  $w_1$  и две вторичные  $w_2$  и  $w_{2в}$  обмотки. Обмотка  $w_2$  подключена к тиристорному выпрямителю VD, выполняющему роль регулятора тока и имеющему полую падающую вольт-амперную характеристику. От вторичной обмотки  $w_{2в}$  напряжение подводится к диодному выпрямительному блоку VD, образующему вспомогательный источник питания дуги с крутопадающей вольт-амперной характеристикой с помощью дросселей  $L_в$ . Вспомогательный источник питания предназначен для зажигания дуги, сварки на малых токах и др. В процессе сварки дуга питается одновременно от обоих источников, что позволяет снизить напряжение холостого хода основного источника и сформировать крутопадающие внешние характеристики в области рабочих токов (рис. 6.13, б). Источники питания используют для сварки вольфрамовым электродом.

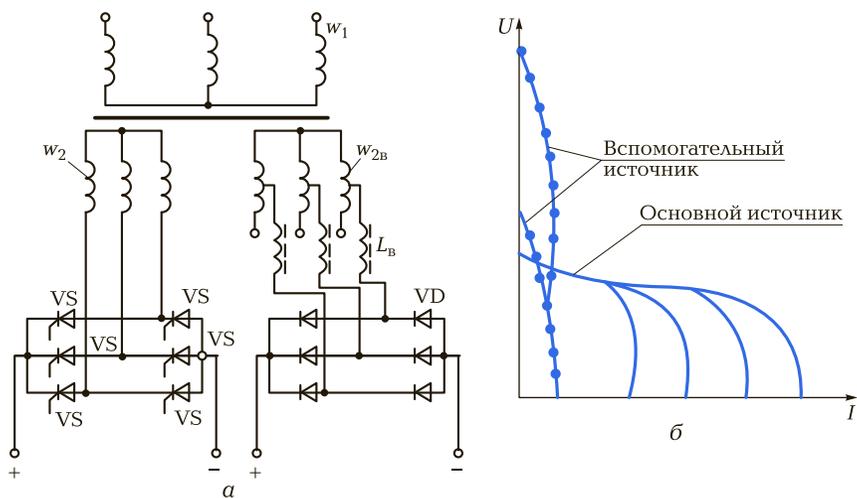


Рис. 6.13. Выпрямление трехфазного переменного тока:

*а* — схема включения; *б* — трехфазный ток внешней цепи;  
 VD — диод;  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_{2в}$  — обмотки первичная и вторичные;  
 $L_B$  — дроссель

### Сварочные коллекторные генераторы и преобразователи.

Источниками постоянного тока для сварки наряду с выпрямителями служат сварочные генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую.

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 силовые линии полюсов генератора, и в ее витках возникает переменный ток, который с помощью коллектора преобразуется в постоянный. К коллектору прижаты угольные щетки, через которые постоянный ток подводится к выходным зажимам. К зажимам присоединяют сварочные провода, идущие к электроду и изделию. Все генераторы имеют намагничивающие обмотки возбуждения, питающиеся от независимого источника (с независимым возбуждением) либо от самого генератора (с самовозбуждением). Изменяя ток намагничивания, осуществляют плавное регулирование напряжения холостого хода, а следовательно, и режима работы генератора.

В генераторах имеется и последовательная обмотка возбуждения с малым числом витков. По этой обмотке, включенной последовательно с дугой, протекает ток, равный силе тока дуги. После-

довательная обмотка секционирована: включают либо все витки, либо часть витков, регулируя ступенчато сварочные режимы в двух диапазонах.

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

Наибольшее распространение получили сварочные генераторы с падающими внешними характеристиками, работающие по схемам с независимым возбуждением и с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой.

В первом случае генератор имеет обмотку независимого возбуждения, питаемую от отдельного источника питания постоянного тока, и размагничивающую обмотку, включенную в сварочную цепь последовательно с обмоткой якоря. Силу тока в цепи независимого возбуждения регулируют реостатом. Магнитный поток, создаваемый обмоткой, противоположен по своему направлению магнитному потоку, создаваемому обмоткой. Результирующий поток представляет собой разность потоков. При этом напряжение на зажимах генератора будет падать, создавая падающую внешнюю характеристику генератора. Сварочный ток в генераторах этой системы регулируют реостатом и секционированием последовательной обмотки. По такой схеме работают генераторы ГСО-300 и ГСО-500.

В генераторах, работающих по второй схеме, намагничивающая обмотка питается постоянным током от части обмотки якоря самого генератора. С этой целью на коллекторе между щетками расположена дополнительная щетка. При включении генератора напряжение между щетками остается постоянным, что позволяет подключить к ним параллельно якорю намагничивающую обмотку возбуждения, создающую постоянный поток. Падающая внешняя характеристика создается действием последовательной размагничивающей обмотки. По такой схеме работают сварочные генераторы ГСО-330-М, ГСО-300-5 и др.

Электрический двигатель вращает якорь генератора. Установку, состоящую из сварочного генератора и приводного трехфазного асинхронного электродвигателя, называют сварочным преобразователем (ПСГ-500). Установку, состоящую из сварочного генератора и двигателя внутреннего сгорания, называют сварочным агрегатом. Агрегаты используют в основном для сварки в полевых

условиях, где отсутствуют электрические сети. Например, дизельный сварочный агрегат АДД-4001С для питания одного поста ручной дуговой сварки постоянным током имеет в качестве привода двигатель Д144-81 мощностью 50 л.с. (37 кВт · А). Номинальный ток агрегата — 400 А (ПН 60 %); пределы регулирования — 60... 450 А; напряжение холостого хода — 100 В; номинальное напряжение — 36 В.

**Источники питания с частотным преобразователем.** Одно из перспективных направлений совершенствования сварочного оборудования — создание энергосберегающих источников питания со звеном повышенной частоты, или инверторных. У этих источников масса и габаритные размеры в 6—9 раз меньше по сравнению с выпускавшимися ранее. Они имеют коэффициент мощности 0,95... 0,98, более высокий КПД, высокие динамические свойства.

На рис. 6.14 приведена блок-схема инверторного источника питания для дуговой сварки. Переменное напряжение питающей сети поступает на низкочастотный выпрямитель НВ и после выпрямления преобразуется инвертором ИНВ в переменное напряжение повышенной частоты 1... 20 кГц. Силовой трансформатор Т включен между инвертором и выходным неуправляемым высокочастотным выпрямителем ВВ. Трансформация осуществляется на повышенной частоте, что позволяет существенно снизить размеры силового трансформатора. Формирование внешних характеристик и регулирование сварочного режима осуществляются системой управления блока обратных связей БОС.

Инверторные источники обеспечивают легкое зажигание и эластичность дуги, мелкокапельный и струйный перенос металла,

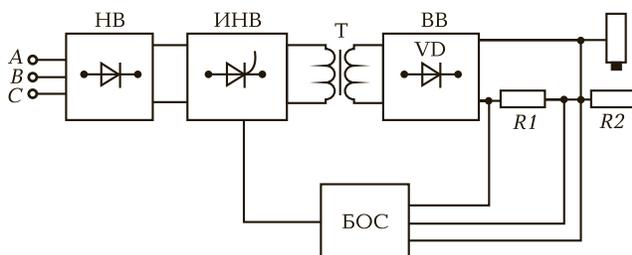


Рис. 6.14. Блок-схема инверторного источника питания:

НВ — низкочастотный выпрямитель; ИНВ — инвертор; Т — трансформатор; ВВ — высокочастотный выпрямитель; БОС — блок обратных связей;  $R_1$ ,  $R_2$  — резисторы; А, В, С — фазы

минимальное разбрызгивание расплавленного металла, понижение напряжения холостого хода до 36 В, экономию электроэнергии на 30...40 %, плавную дистанционную регулировку параметров тока и напряжения.

Инверторный тиристорный источник ВДУЧ-30 с плогопадающими и крутопадающими внешними характеристиками — универсальный выпрямитель для механизированной сварки в среде защитных газов и для ручной дуговой сварки. Структуру источника можно представить состоящей из двух основных узлов: сетевого выпрямителя и конверторного преобразователя. Сетевой выпрямитель выполнен по мостовой схеме на оптотиристорах и диодах. Кроме основной функции (выпрямление напряжения сети) он сглаживает пульсации входного напряжения, обеспечивает плавную зарядку накопительного конденсатора при включении источника, контроль за величиной входного напряжения, отключение выпрямителя при аварийных режимах. Конверторный преобразователь преобразует выпрямленное напряжение в напряжение сварочного контура с гальванической развязкой контуров. В его состав входят высокочастотный регулируемый инвер-

**Таблица 6.5. Технические характеристики инверторных сварочных источников**

Параметр	«Хобби-110»	MW2500MV	MW3000MV
Напряжение/частота питающей сети, В/Гц	220/50	220/50	220/50
Первичный ток, А, не более	12	16	16
Первичный ток в режиме короткого замыкания, А	7,5	9	9
Вторичный ток, А, не более	110	250	300
Номинальный вторичный ток, А	100	220	270
Способ регулировки сварочного тока	Ручной (3 ступени)	Ручной плавный	Ручной плавный
Напряжение холостого хода, В	36	89	89
Масса, кг, не более	10	28	30

тор, трансформаторно-выпрямительное устройство, работающее на высокой частоте, и выходной сглаживающий дроссель. Полумостовой тиристорный инвертор с резонансной коммутацией и диодами обратного тока содержит высокочастотные конденсаторы, катушки индуктивности и тиристорно-диодные ячейки. Выпрямительное устройство выполнено на стержневом трансформаторе с ферритовым сердечником.

В целях повышения сварочных показателей схема инвертора обеспечивает кратковременное форсирование режимов работы при зажигании дуги и капельных коротких замыканиях в процессе сварки. Частота пульсаций выходного напряжения источника в номинальном режиме — 5 кГц.

Технические характеристики некоторых марок инверторных источников питания приведены в табл. 6.5.

**Вспомогательные устройства для источников питания.** При сварке неплавящимся электродом в среде защитных газов первоначальное возбуждение дуги производится бесконтактным способом. Напряжения холостого хода источника питания (60...80 В) недостаточно для того, чтобы вызвать электрический разряд. Для возбуждения дуги необходим кратковременный импульс напряжения, который обеспечил бы пробой и последовательное развитие искрового разряда вплоть до дугового. Для решения этой задачи источники питания для сварки в среде защитного газа снабжают дополнительным устройством — сварочным осциллятором.

Осциллятор представляет собой генератор затухающих по амплитуде переменных высокочастотных (100...300 кГц) импульсов высокого напряжения (около 3 кВ). Применяют две схемы включения осциллятора в цепь дуги — параллельную и последовательную. В схеме параллельного включения (рис. 6.15) трансформатор Т1 промышленной частоты 50 Гц повышает напряжение сети до 3...6 кВ. Его вторичная обмотка подключена к разряднику  $F$ , входящему в колебательный контур  $C_k - L_k$ , в котором возникают колебания частотой 150...300 кГц. При возрастании напряжения на выходе трансформатора заряжается конденсатор  $C_k$ .

По достижении определенного напряжения на вторичной обмотке трансформатора происходит пробой искрой воздушного промежутка разрядника. Конденсатор  $C_k$  разряжается на катушку индуктивности  $L_k$ , являющуюся первичной обмоткой высокочастотного трансформатора Т2. Последний осуществляет магнитную связь осциллятора со сварочным контуром  $L_c$ , который содержит источник питания ИП. В колебательном контуре возникает знакопеременный, затухающий по амплитуде колебательный процесс.

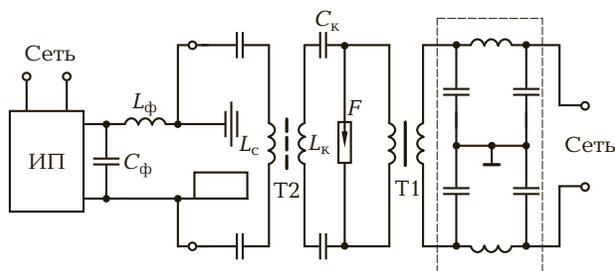


Рис. 6.15. Схема осциллятора параллельного включения:

ИП — источник питания;  $L_\phi$ ,  $L_c$ ,  $L_k$  — катушки индуктивности;  $C_\phi$ ,  $C_k$  — конденсаторы; T1 — трансформатор промышленной частоты; T2 — высокочастотный трансформатор; F — разрядник

Трансформатор T2 через вторичную обмотку осуществляет подачу высокочастотных импульсов высокого напряжения на дуговой промежуток. Защита источника от воздействия этого напряжения осуществляется с помощью фильтра, состоящего из индуктивности  $L_\phi$  и емкости  $C_\phi$ . Импульсы колебаний, генерируемых осциллятором, периодически повторяются после восстановления электрической прочности разрядника.

Электрическая схема осциллятора последовательного включения показана на рис. 6.16. Трансформатор T1 повышает напряжение сети и подает его на разрядник F, входящий в колебательный контур  $C_k - L_k$ . Катушка индуктивности колебательного контура включена последовательно с дугой. Сечение обмотки рассчитывается исходя из сварочного тока, генерируемого источником пита-

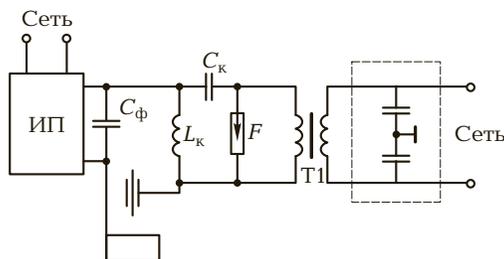


Рис. 6.16. Схема осциллятора последовательного включения:

ИП — источник питания;  $L_k$  — катушка индуктивности;  $C_\phi$ ,  $C_k$  — конденсаторы; T1 — повышающий трансформатор; T2 — высокочастотный трансформатор; F — разрядник

ния ИП. Защита источника от воздействия высокочастотного высокого напряжения, возникающего на катушке индуктивности при разряде конденсатора, осуществляется путем шунтирования источника конденсатором  $C_{\text{ф}}$ . Осцилляторы последовательного включения компактнее и проще рассмотренных ранее. Они обычно работают только в начале процесса сварки. В схемах источников питания предусмотрено автоматическое отключение осциллятора после возбуждения дуги.

Импульсный стабилизатор горения дуги переменного тока применяют при сварке переменным током неплавящимся электродом изделий из легких сплавов в среде защитного газа. При этом виде сварки возникают трудности повторного возбуждения дуги при переходе на обратную полярность.

Устройство для плавного снижения сварочного тока позволяет предотвратить появление кратера шва при быстром гашении дуги в конце сварки. Это возможно при плавном уменьшении сварочного тока до нуля примерно за 5...6 с. В установках для автоматизированной сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов данный процесс осуществляется автоматически с помощью специального узла — регулятора спада сварочного тока (РССТ), воздействующего на цепь управления регулятора сварочного тока. На практике данный процесс происходит благодаря разряду предварительно заряженного конденсатора на резистивное сопротивление. Для уменьшения емкости конденсаторной батареи в РССТ современных источников используют промежуточные полупроводниковые усилители на транзисторах. В этом случае разряд конденсаторной батареи происходит на цепь эмиттер — база транзистора, а обмотка регулятора тока включена в коллекторную цепь транзистора, где ток в 30—40 раз больше тока базы. Промежуточный полупроводниковый усилитель на транзисторах в схеме РССТ позволяет не только существенно уменьшать емкость батареи, но и регулировать время снижения сварочного тока.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Чем отличается аппарат для механизированной сварки от аппарата для ручной сварки?
2. Расскажите о системе обозначения аппаратов для дуговой сварки.
3. По каким признакам классифицируются полуавтоматы?

4. Из каких основных элементов состоит горелка для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом?
5. Расскажите о назначении гибких шлангов.
6. Какие типы подающих механизмов вы знаете?
7. Что входит в состав поста для ручной дуговой сварки в защитных газах?
8. Какие типы расходомеров вы знаете?

## ДУГОВЫЕ МЕТОДЫ РЕЗКИ

### 7.1. КИСЛОРОДНО-ДУГОВАЯ И ВОЗДУШНО-ДУГОВАЯ РЕЗКА

Сущность *кислородно-дуговой резки* заключается в том, что между электродом и разрезаемой заготовкой возбуждается электрическая дуга, которая и осуществляет расплавление металла. Удаление металла из зоны реза осуществляется струей кислорода или воздуха. При кислородно-дуговой резке кислород поступает в зону реза по внутреннему каналу металлического электрода (рис. 7.1), покрытого обмазкой специального состава.

Рукоятка горелки обеспечивает закрепление электрода и подачу кислорода. Процесс начинается с возбуждения дуги между электродом и металлом, затем в зону реза подается кислород, осуществляющий окисление металла в зоне реза и принудительное удаление продуктов реакции из полости реза. Режущая струя кислорода подается вслед за электродом. Режимы кислородно-дуговой механизированной резки стали представлены в табл. 7.1.

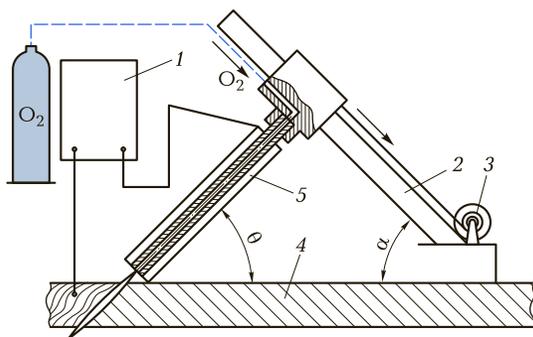


Рис. 7.1. Схема кислородно-дуговой резки:

1 — источник электропитания; 2 — направляющая; 3 — электропривод; 4 — разрезаемый металл; 5 — электрод

**Таблица 7.1. Режимы кислородно-дуговой механизированной резки сталей**

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сила тока дуги, А	Расход кислорода, м <sup>3</sup> , на 1 м длины линии реза	Скорость резки, м/ч
10	4	100	0,1	30
15	4	170	0,13	28
20	4	180	0,16	26
30	5	220	0,29	22
40	5	240	0,37	17
50	5	260	0,4	12

Кислородно-дуговой резкой можно резать углеродистые, легированные, коррозионно-стойкие стали, чугун, цветные металлы. Резку ведут трубчатыми стальными и тугоплавкими неметаллическими (графитовыми, угольными) электродами, а также обычными стальными покрытыми электродами на постоянном и переменном токе.

При подводной кислородно-дуговой резке применяют плавящиеся и неплавящиеся электроды. Плавящиеся электроды изготавливают из стальных трубок наружным диаметром 8 мм, с толщиной стенки 2,0...2,5 мм, длиной 400 мм. На поверхность трубки наносят водоупорное покрытие, которое позволяет опирать электрод на поверхность металла, что обеспечивает постоянное расстояние между электродом и металлом и стабильность горения дуги. Расход электродов при резке высокий (примерно 1 шт./мин), поэтому при резке металла под водой применяют карборундовое покрытие, увеличивающее время работы одним электродом до 40 мин. При резке на воздухе применяют полые угольные или графитовые электроды, обеспечивающие значительную экономию металла по сравнению с применением металлических электродов.

*Воздушно-дуговую резку* металлов выполняют сплошным угольным или графитовым электродом, закрепляемым в электрододержателе. В неподвижной губке электрододержателя просверлены отверстия для подачи воздуха параллельно оси электрода.

Различают два вида воздушно-дуговой резки: разделительную и поверхностную. При разделительной резке электрод углублен в полость реза (рис. 7.2, а) под углом к поверхности разрезаемого металла 60...90°. При поверхностной воздушно-дуговой резке дуга

горит между концом электрода и поверхностью обрабатываемого металла, а электрод наклонен к поверхности под углом  $30^\circ$  в сторону, обратную направлению резки (рис. 7.2, б). Резку выполняют на постоянном токе обратной полярности; при этом напряжение на дуге составляет 45...50 В, сила тока — 250...500 А (для отдельных резаков — до 1600 А), диаметр электрода — 6...12 мм, давление воздуха — 0,4...0,6 МПа, расход воздуха — 20...40 м<sup>3</sup>/ч, масса выплавленного металла — до 20 кг/ч.

Кислородно-дуговые и воздушно-дуговые способы разделительной резки не обеспечивают высокого качества поверхности реза, поэтому их применяют лишь в тех случаях, когда не требуется высокое качество поверхности реза или имеются затруднения с горючим газом.

Неравномерность движения электрода может приводить при ограниченном токе к касаниям электрода к металлу, что вызывает местное науглероживание металла. Содержание углерода повышается на поверхности реза также при малом давлении воздуха (до 392 кПа). При оптимальных параметрах воздушно-дуговой поверхностной резки зона с повышенным содержанием углерода на поверхности реза не превышает 0,06...0,08 мм. Для повышения пластичности металла поверхности реза после воздушно-дуговой поверхностной резки рекомендуется обработка канавки шлифовальным кругом на глубину до 0,5 мм.

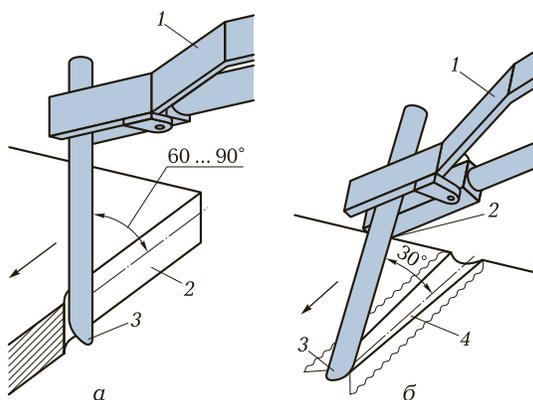


Рис. 7.2. Схема воздушно-дуговой резки:

- а — разделительная резка; б — поверхностная резка;
- 1 — электрододержатель; 2 — струя воздуха; 3 — электрод;
- 4 — разрезаемый металл

Наибольшее распространение получила поверхностная воздушно-дуговая резка при выборке дефектов сварных швов, удалении дефектов на стальных, чугунных и цветных отливках. Поверхностная воздушно-дуговая резка высоколегированной стали и чугуна конкурирует с поверхностной кислородно-флюсовой резкой высоколегированных сталей и чугуна, так как при ее применении не требуются флюс, горючий газ и кислород.

В качестве источников тока для воздушно-дуговой резки используют сварочные преобразователи, выпрямители повышенной мощности, источники переменного тока с жесткой вольт-амперной характеристикой. Это обеспечивает устойчивое ведение процесса зачистки в электроимпульсном режиме при токе силой до 2 000 А.

Для подачи воздуха применяют компрессоры производительностью до 20...30 м<sup>3</sup>/ч. На линии подачи воздуха рекомендуется устанавливать влаго- и маслоотделители. Качество и производительность ручной воздушно-дуговой резки во многом зависят от квалификации резчика, так как из-за неравномерности подачи электрода во время резки может изменяться глубина канавки.

## 7.2. ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ РЕЗКА

Низкотемпературная плазма представляет собой нагретый до 10 000...50 000 °С электропроводящий газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных газовых частиц, содержащихся в равных количествах. Низкотемпературную плазму для резки получают обычно в электрической дуге, создаваемой в специальном инструменте — плазмотроне, пропуская через него технические газы.

Разработаны две схемы плазменно-дугового разряда: плазменная дуга (рис. 7.3, а), возбуждаемая между катодом плазмотрона и обрабатываемым металлом (дуга прямого действия), и плазменная струя (рис. 7.3, б), возбуждаемая между независимыми от обрабатываемого материала электродами (независимая дуга). В обеих схемах дуговой разряд возбуждается в узких каналах плазмотронов, которые позволяют при относительно небольших расходах плазмообразующей среды получать значительные скорости потоков плазмы.

Сущность процесса плазменно-дуговой резки заключается в расплавлении высокотемпературным потоком газов металла в ог-

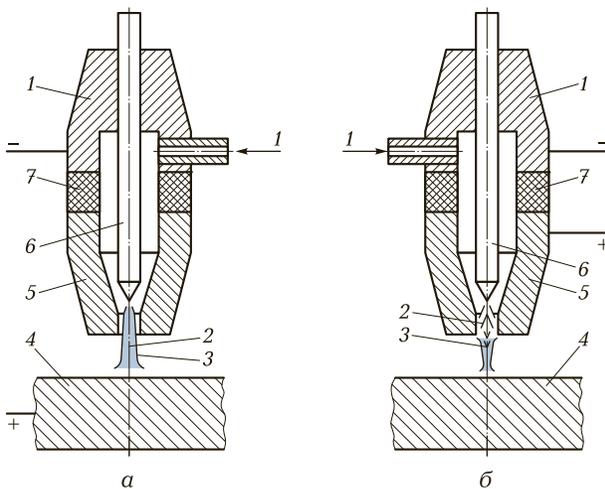


Рис. 7.3. Схемы плазмообразования:

*а* — плазменная дуга; *б* — плазменная струя; 1 — газ; 2 — дуга; 3 — струя плазмы; 4 — обрабатываемый металл; 5 — наконечник; 6 — катод; 7 — изолятор

раниченном объеме с последующим удалением расплава из полости реза струей.

Толщина разрезаемого металла зависит от мощности дуги и, в первую очередь, от напряжения на дуге. На глубину прорезания влияют характеристики источника тока, размеры каналов режущих сопел, состав и расход газов. Сила тока задается такой, чтобы обеспечить выделение в столбе дуги электрической мощности, при которой интенсивность расплавления металла соответствует заданной скорости резки.

Сравнение энергетических параметров резки плазменной струей и плазменной дугой показало, что эффективная мощность нагрева возрастает с увеличением силы тока, расхода плазмообразующих газов (до определенного предела), причем у плазменной дуги она значительно выше. Удельный тепловой поток в центре пятна нагрева при резке плазменной дугой и составляет  $10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, что на порядок выше, чем при резке плазменной струей. Тепловой КПД плазменной дуги при оптимальных режимах резки составляет 70...80%, что на 10...30% выше КПД нагрева металла плазменной струей, поэтому схема резки плазменной струей применяется лишь при резке неметаллических материалов и в ряде случаев при резке тонкого метал-

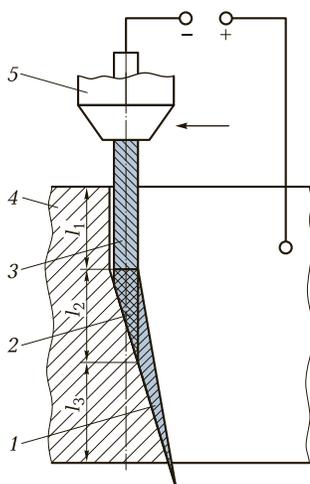


Рис. 7.4. Схема строения плазменно-дугового разряда прямого действия:

1 — факел дуги; 2 — анодное пятно; 3 — столб дугового разряда; 4 — разрезаемый металл; 5 — плазмотрон;  $I_1$  — зона теплопередачи столба;  $I_2$  — зона скольжения пятен;  $I_3$  — зона теплопередачи факела

ла. Наибольшее распространение получила плазменно-дуговая резка.

При плазменно-дуговом способе рез образуется тремя различными участками плазменной дуги: столбом, анодным пятном и факелом (рис. 7.4), которые имеют различную эффективность нагрева металла, причем наименьшая — у факела. Наличие в столбе дуги трех различных участков с разной эффективной тепловой мощностью влияет на конусность резов при плазменно-дуговой резке значительно больше, чем при кислородной резке.

### 7.3. ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИЕ СРЕДЫ

В качестве плазмообразующих сред при плазменно-дуговой резке используют различные технические газы, которые по своему воздействию на катод подразделяются на неактивные (аргон, азот, водород) и активные (воздух, кислород). Плазмообразующие среды должны обеспечивать надежное зажигание дуги и хорошую стабилизацию дуги, эффективное преобразование электрической энергии в тепловую и наиболее равномерную передачу энергии по толщине разрезаемого металла, отсутствие неблагоприятного воздействия на электрод и поверхность разрезаемого металла.

Начало развития плазменно-дуговой резки связано с применением в качестве плазмообразующей среды аргона. Он обеспечи-

вает хорошую защиту вольфрамового электрода, легко ионизируется под действием дугового разряда и не оказывает вредного воздействия на металл поверхности реза. Однако аргон и другие инертные газы являются дорогостоящими. Кроме того, они не могут диссоциировать в столбе дугового разряда, поэтому не выделяют дополнительное количество теплоты в полость реза.

Активными теплоносителями являются двух- и трехатомные газы, поэтому их применяют в качестве добавки к аргону. Добавка водорода к аргону в количестве 15...20 % обеспечивает увеличение прорезающей способности дуги и производительности резки. Дальнейшее повышение содержания водорода в смеси приво-

**Таблица 7.2. Плазмообразующие среды для резки металлов**

Плазмообразующая среда	Разрезаемый металл				
	Алюминий и его сплавы	Медь и ее сплавы	Высоколегированные стали	Конструкционные, низкоуглеродистые и низколегированные стали	Титан
Воздух	Для механизированной резки металла толщиной до 120 мм	Для механизированной резки металла толщиной до 70 мм	Для машинной резки металла толщиной до 100 мм		Не рекомендуется
Азот	Для ручной резки металлов				
Аргон с водородом	Для ручной и механизированной резки	Для резки металлов с высоким качеством поверхности относительно небольшой толщины			
Азот с водородом	Для ручной и механизированной резки				
Аргон	Не рекомендуется				Для ручной и механизированной резки

дит к резкому повышению напряжения на дуге. Аргонородные смеси применяют при резке таких легких металлов, как алюминий, магний и их сплавы. В практике плазменно-дуговой резки цветных металлов широко используют менее дорогостоящие азтородные смеси. Качество резов, выполненных этими смесями, немного ниже, чем при использовании аргонородных смесей.

Процесс воздушно-дуговой резки с использованием в качестве плазмообразующей среды сжатого воздуха широко применяется при резке конструкционных и высоколегированных сталей. Для повышения производительности резки применяют также плазмообразующие среды с более высоким содержанием кислорода, чем в воздухе, или чисто кислородную смесь. Однако в этом случае приходится осуществлять защиту электрода каким-либо неактивным газом (аргоном, азотом). В табл. 7.2 приведены указания по применению ряда плазмообразующих сред для резки различных металлов. Общей закономерностью является использование активных газовых смесей преимущественно для резки черных металлов, а неактивных газов и их смесей — для резки цветных металлов и их сплавов.

## 7.4. РЕЖУЩИЕ ПЛАЗМОТРОНЫ

Конструкции режущих плазмотронов содержат два основных блока: электродный и сопловой. Они электрически изолированы друг от друга и содержат узлы для подачи плазмообразующих газов, основного и вспомогательного тока, крепления электрода, а также систему охлаждения электрода и сопла (рис. 7.5). Электродный и сопловой узлы образуют дуговую камеру, в которой возбуждается дуговой разряд при подаче плазмообразующих газов.

В зависимости от способа плазменно-дуговой резки в качестве электродов применяют вольфрамовый лантанированный стержень (при использовании аргона, азота, водорода) или медный водоохлаждаемый электрод с циркониевой или гафниевой вставкой (при использовании в качестве рабочего газа окислительных сред: воздуха, обогащенного воздуха, или кислорода). Цирконий и гафний при воздействии высокой температуры дугового разряда образуют на поверхности тугоплавкую оксидную пленку, в дальнейшем предохраняющую электрод от эрозии в процессе резки. Однако стойкость этих электродов ввиду воздействия

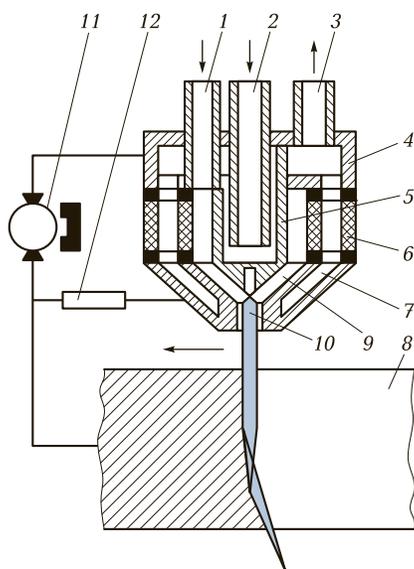


Рис. 7.5. Схема режущего плазмотрона:

1 — штуцер подачи плазмообразующего газа; 2 — штуцер подачи охлаждающей воды; 3 — штуцер слива воды; 4 — катодный блок; 5 — катодная вставка; 6 — изолирующая втулка; 7 — сопло; 8 — разрезаемый металл; 9 — дуговая камера; 10 — плазменная дуга; 11 — источник электропитания; 12 — балластное сопротивление

очень высоких температур невысока и время их работы не превышает 2...4 ч.

В зависимости от способа подачи плазмообразующих газов в дуговую камеру различают осевой и вихревой способы стабилизации дуги. В первом случае плазмообразующая среда подается в дуговую камеру потоком, параллельным оси электрода (рис. 7.6, а), в другом — по тангенциальным каналам, что обеспечивает закручивание потока (рис. 7.6, б). В плазмотронах с осевой стабилизацией стержневой катод затачивают под углом 20...30° при вершине, что позволяет создать четкую фиксацию катодного пятна на оси столба дуги соосно с выходным отверстием сопла. В качестве регулируемых катодов используют лантанированные вольфрамовые стержни диаметром 2...6 мм и длиной 100...150 мм. Стойкость стержневого катода зависит главным образом от плотности тока; наименьший расход катодов достигается при выборе их диаметра в соответствии с табл. 7.3.

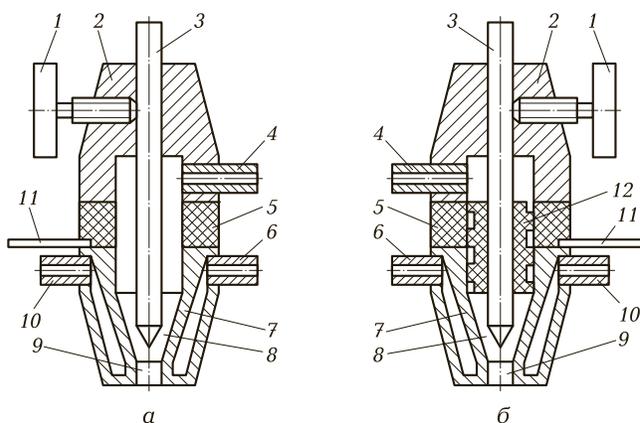


Рис. 7.6. Схемы режущих плазматронов с осевой [а] и вихревой [б] стабилизацией дугового разряда:

1 — крепление катода; 2 — катодный узел; 3 — катод; 4 — подача газа; 5 — изолятор; 6, 10 — система охлаждения; 7 — сопловой узел; 8 — дуговая камера; 9 — формирующее сопло; 11 — крепление плазматрона; 12 — завихритель

Несмотря на относительно высокую электропроводимость вольфрам сильно разогревается рабочим током, поэтому вылет электрода должен быть минимальным. Стержневые катоды обеспечивают длительный срок службы при многократной регулировке вылета электрода, поэтому они получили широкое распространение в ручных плазматронах.

В плазматронах для механизированной резки используют преимущественно гильзовые медные водоохлаждаемые катоды с цир-

Таблица 7.3. Ориентировочные диаметры вольфрамовых электродов и формирующих сопел в зависимости от силы тока

Сила тока, А	Диаметр электрода, мм	Диаметр формирующего сопла, мм
150	2	1,2... 1,6
300	2,5	2... 3
400	3,2	3... 4
500	4	4... 6
600	4,5	5... 7

кониевой или гафниевой вставкой. При осевой стабилизации дуги вставка должна быть заострена, при вихревой стабилизации можно применять плоский катод. В последнем случае фиксация катодного пятна в центре вставки обеспечивается стабилизацией оси потока вследствие его закручивания.

Гильзовые катоды работают при высоких плотностях тока и поэтому нуждаются в интенсивном охлаждении. Для этого наружные поверхности гильзы омываются проточной водой, а вставки плотно запрессовываются в гильзу. В последнее время установки для плазменно-дуговой резки стали оснащать блоками автономного охлаждения, в которых охлаждающая вода циркулирует в замкнутом объеме, а ее охлаждение в процессе работы осуществляется в радиаторах. В зимнее время вместо воды систему можно заполнять незамерзающими жидкостями.

Основным элементом соплового узла является формирующий наконечник. Форма и размеры соплового канала в значительной степени определяют параметры режущей струи. Чем меньше сечение выходного отверстия сопла и чем больше его длина, тем выше при прочих одинаковых условиях плотность энергии, а следовательно, скорость потока плазмы и производительность резки. Однако наименьший диаметр выходного отверстия ограничивается возникновением двойных дуг, так называемых дуговых разрядов, одновременно с основной дугой — между катодом и соплом, соплом и разрезаемым металлом. Двойная дуга возникает, если сумма анодного падения напряжения на дуге катод—сопло и катодного падения напряжения на дуге сопло—разрезаемый металл будет меньше падения напряжения в столбе дуги на участке формирующего сопла наконечника. Это может быть связано с неправильной работой источника питания или недостатком расхода плазмообразующего газа. Наиболее часто двойное дугообразование (рис. 7.7) возникает в момент возбуждения режущей дуги.

В современных установках режущую дугу возбуждают с помощью высокочастотного

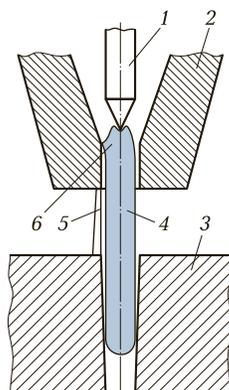


Рис. 7.7. Схема двойной дуги:

1 — катод; 2 — сопло; 3 — металл; 4 — столб режущей дуги; 5, 6 — столб двойной дуги на участках наконечник—металл и катод—наконечник

вспомогательного разряда (рис. 7.8). Сначала возбуждается вспомогательная дуга небольшой мощности (при токе 15...40 А) между электродом и наконечником; она не приводит к разрушению наконечника или катода. Затем при касании потока плазмы, вытекающего из сопла поверхности разрезаемого металла, плазменная дуга замыкает рабочую цепь источника тока, вследствие чего возникает режущая дуга. Если при возбуждении режущей дуги плазменный столб вспомогательной дуги был сформирован недостаточно четким, то анодное пятно режущей дуги может перейти на наконечник, что приведет к расплавлению стенок сопла и выходу резака из строя. После включения режущей плазменной дуги напряжение между электродом и наконечником снижается и вспомогательная дуга гаснет.

Двойное дугообразование может произойти в процессе резки в следующих случаях:

- при пробивке начального отверстия в листе из-за брызг расплавленного металла, летящих на резак;
- случайном касании наконечником поверхности металла;
- плохой работе системы стабилизации положения резака над металлом;
- скачках тока в сети или случайном уменьшении расхода плазмообразующего газа.

Источники тока, используемые в настоящее время, имеют устройства (токовые реле) для отключения аппарата от сети в случае двойного дугообразования и возрастания силы тока в цепи.

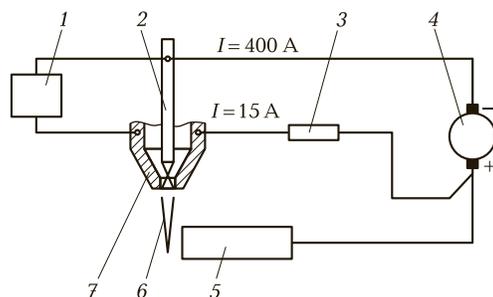


Рис. 7.8. Высоочастотное возбуждение дуги вспомогательным разрядом:

1 — осциллятор; 2 — катод; 3 — наконечник; 4 — балластное сопротивление; 5 — источник тока; 6 — металл; 7 — факел дуги

Наконечники плазмотронов обычно изготавливают из меди — металла, обладающего высокой теплопроводностью, что необходимо для хорошего охлаждения наконечника. Однако, несмотря на интенсивное охлаждение водой медных формирующих сопел, износ их из-за высокой температуры газов в столбе дуги велик.

Для обеспечения стабильности горения дуги и уменьшения возможности двойного дугообразования диаметр сопла выходного отверстия должен быть больше (или равен) диаметра катода; длина сопла должна быть меньше его диаметра. Диаметр катода определяется током дуги. Износ сопла существенно уменьшается при вихревой стабилизации сопла, однако срок его службы не превышает, как правило, 7...8 ч. Вследствие этого для повышения ресурса плазмотронов в наконечнике закрепляют специальные сменные сопловые вставки.

## 7.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЗКИ

Скорость плазменно-дуговой резки возрастает с увеличением мощности дуги. Скорость возрастает в большей мере при увеличении напряжения на дуге и в меньшей степени при росте рабочего тока дуги, повышение которого приводит к увеличению ширины реза. Величина напряжения на дуге характеризует степень проникновения дуги в разрезаемый металл, поэтому с увеличением толщины разрезаемого металла необходимо повышать напряжение на дуге. Наиболее выгодно резать металл «жесткими» дугами (с высоким напряжением режущей дуги), что обеспечивает большие скорости резки и качество поверхности реза. Более легкие металлы с меньшей теплоемкостью металла и меньшей теплопроводностью разрезаются с большими скоростями. При прямолинейной разделительной плазменно-дуговой резке скорость резки может быть выше на 20...30 %, чем при вырезке фигурных деталей из листовой стали.

При оптимальных режимах плазменно-дуговой резки качество поверхности реза не уступает качеству поверхности при кислородной резке металлов, за исключением неперпендикулярности. В соответствии с ГОСТ 14792—80 качество плазменно-дуговой резки оценивают следующими основными показателями: размерный допуск, неперпендикулярность реза, шероховатость поверхности, глубина ЗТВ. Для каждого показателя в зависимости от толщины разрезаемого металла устанавливаются три нормируе-

мых показателя качества и точности, определяющих назначение и условия использования резцов. Класс 1 предъявляет самые высокие требования к качеству поверхности плазменно-дуговой резки; класс 2 соответствует требованиям, реально достигаемым в производственных условиях; класс 3 предъявляет минимальные требования к предельным значениям показателей.

Для обеспечения высоких качества реза и производительности резки необходимо тщательное проведение подготовительных операций, которые начинаются с транспортирования металла к месту резки. При транспортировании должны быть приняты меры, исключающие деформацию листового металла и повреждения его поверхности. Это особенно относится к тонкому мягкому листовому металлу, например алюминию и некоторым его сплавам, меди и др. Такой металл целесообразно транспортировать на специальных тележках; при транспортировании краном следует применять пневматические присосы, равномерно размещаемые по поверхности металла.

Перед резкой для уменьшения дымообразования и повышения качества реза поверхность листового металла очищают от бумаги и консервирующей смазки; при ремонтных или демонтажных работах поверхность металла перед резкой можно не очищать. В месте начала реза необходимо удалить краску, а также ржавчину в целях обеспечения электрического контакта факела вспомогательной дуги с этим участком.

Обрабатываемый металл должен надежно контактировать с положительным (заземляющим) проводом. Если нельзя гарантировать надежный контакт, целесообразно подводить положительный провод к контактной струбине, укрепляемой на разрезаемом изделии.

Для ручной или полуавтоматической резки детали размечают прочерчиванием и кернением контура с шагом между точками 10...20 мм. Меловая разметка не обеспечивает точного воспроизведения контура и с поверхности некоторых металлов легко стирается (сдувается). При разметке деталей учитывают припуски на резку в зависимости от назначения вырезаемых деталей.

В большинстве случаев при машинной разделительной резке подготовительную операцию разметки заменяют копированием или программным контурным управлением.

При возбуждении режущей дуги важно установить плазмотрон над начальной кромкой разрезаемого металла или подвести его к кромке с горящим факелом вспомогательной дуги таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить возбуждение режу-

щего разряда без образования двойной дуги, а с другой стороны, исключить возможность неполного прорезания начальной кромки.

Для этого плазмотрон устанавливают над начальной кромкой таким образом, чтобы ось формирующего сопла была от нее на расстоянии 3...5 мм. При значительном увеличении этого расстояния факел вспомогательной дуги может не обеспечить электрического контакта с разрезаемым металлом. Если при этом и произойдет контакт, то столб режущей дуги может отклониться в сторону кромки настолько, что возникнет двойная дуга. При задержке резака на какое-то время у кромки дуга успеет ее проплавить; при этом образуется полуцилиндрическая канавка большой ширины, поэтому после возбуждения режущей дуги не следует задерживать резак у начальной кромки более чем на 2...5 с (в зависимости от толщины металла). При врезании движущимся плазмотроном необходимо следить за тем, чтобы режущий плазмотрон начал двигаться только тогда, когда режущая дуга проплавит металл по всей толщине. Несоблюдение этого требования может привести к начальному непрорезу и затруднениям с отделением вырезанной детали от обреза, а также вызвать образование двойной дуги.

При вырезке внутреннего контура фланца необходимо пробить начальное отверстие. При резке листового металла средней или малой толщин начальное отверстие можно получить прожиганием плазмотроном; для этого зажигают вспомогательную дугу. Плазмотрон должен быть поднят над точкой пробивки отверстия на расстояние, исключающее возбуждение режущей дуги (зазор между торцом плазмотрона и разрезаемым металлом составляет около 50 мм). Затем плазмотрон постепенно опускают до возникновения режущей дуги, вновь приподнимают на 4...6 мм и перемещают в направлении контура реза (или по контуру) или включают рабочий ход режущей машины. При этом поток выплавляемого металла выбрасывается в сторону, противоположную направлению резки. После пробивки металла плазмотрон опускают до 3...10 мм над поверхностью изделия. Таким образом удается пробивать отверстия в металле толщиной до 40...50 мм, при этом не исключена возможность повреждения наконечника выбрасываемым металлом. Отверстия в листовом металле можно пробивать по описанному методу, но с применением ручного резака с одним из старых сопел, не используемых для резки по контуру.

При большой толщине листового металла, в случаях когда невозможно пробивать отверстия с помощью плазмотрона, началь-

ное отверстие засверливают. Чтобы начальное отверстие не увеличивало ширины реза, диаметр его должен быть меньше ширины намечаемого реза. При возбуждении дуги плазмотрон немного смещают от оси отверстия.

В процессе резки необходимо поддерживать постоянное расстояние между торцом наконечника плазмотрона и поверхностью разрезаемого металла. Это расстояние должно быть минимальным, так как с его увеличением возрастает неперпендикулярность кромок реза в его верхней части. Однако при очень малом расстоянии сопло может выйти из строя от случайных замыканий с крупными брызгами металла, приварившимся шлаком и т.п. Обычно указанное расстояние должно составлять 3...10 мм. При машинной резке рекомендуется использовать системы вертикального слежения (плавания) режущего плазмотрона.

В процессе резки о правильности назначенного режима можно судить по потоку искр, выбрасываемых из полости реза (рис. 7.9). Если выбрасываемый поток искр перпендикулярен поверхности листового металла, то образующиеся поверхности кромок близки к параллельным (рис. 7.9, а); если этот поток отклоняется в сторону, противоположную движению резака, то неперпендикулярность образующегося реза не превышает требований для класса 3 (рис. 7.9, б). Значительное отклонение потока искр от перпендикуляра к поверхности реза и стекание выплавленного металла в виде крупных капель указывают на то, что скорость резки близка к предельно возможной и может возникнуть неполное прорезание (рис. 7.9, в). В этом случае брызги металла выбрасываются вверх или в сторону реза.

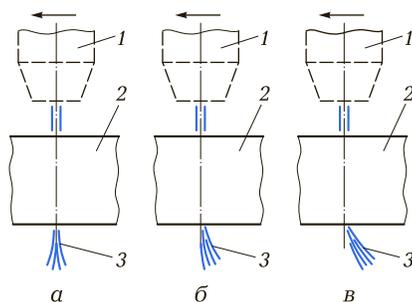


Рис. 7.9. Контроль качества резки по факелу дуги:

а — небольшая скорость; б — оптимальная скорость; в — высокая скорость; 1 — плазмотрон; 2 — металл; 3 — факел дуги (стрелками показано направление резки)

При вырезке контура, в котором прямолинейные участки сопрягаются под углом, в месте сопряжения скорость резки должна быть уменьшена до такой величины, при которой образуется рез с параллельными кромками. Это же относится к резке деталей с криволинейными контурами средней и большой кривизны. При несоблюдении данного требования размеры вырезанной детали (по нижней и верхней плоскостям) будут значительно отличаться от размеров, заданных вследствие большого отставания. Обычно при криволинейной резке скорость уменьшают на 25...30%. При прямолинейной резке скорость также уменьшают при завершении реза, так как в противном случае возможно неполное прорезание по толщине металла.

При назначении режимов необходимо учитывать особенности резки различных металлов: алюминия и его сплавов, легированных и низкоуглеродистых сталей, меди и ее сплавов, титана, никеля и двухслойных сталей.

Алюминий и его сплавы склонны к образованию тугоплавких оксидов. Необходимо обеспечить удаление окисленного металла из полости реза, его защиту от окисления, а также выбрать условия, способствующие образованию оплавленной пленки минимальной толщины. Алюминий в расплавленном состоянии активно поглощает водород, поэтому очень важно, чтобы литой участок на кромке реза алюминия был минимальных размеров.

Алюминиевые сплавы толщиной 5...20 мм можно резать в азоте или воздухе. Качество резки ухудшается при обработке алюминиевых сплавов толщиной 60 мм и более. Алюминий толщиной 30...160 мм целесообразнее резать в азотно-водородных смесях. Для получения поверхностей резов с минимальной шероховатостью алюминий режут в аргоноводородных смесях. Качество поверхности реза зависит от содержания водорода в смеси. При малом содержании водорода поверхность получается шероховатой и у нижней кромки скапливается стекающий металл. Высокое качество поверхности обеспечивается при использовании аргоновой смеси, содержащей 35...50% водорода. Качество поверхностей по всей толщине реза практически равноценно. Натёки на нижних кромках резко уменьшаются. При содержании в смеси более 60% водорода на поверхностях реза появляются глубокие штрихи. У верхней кромки реза наблюдается оксидная пленка, затекающая с поверхности листового металла; у нижней кромки вновь появляются натёки металла.

В оплавленном слое алюминиево-магниевого сплава наблюдается равномерное по толщине реза выгорание магния. Внешний

признак выгорания — интенсивное выделение белого дыма. При резке этих сплавов необходимо точное соблюдение режимов резки. Резы высокого качества могут быть получены при максимальной скорости резки и содержании в аргоновой смеси 50 % водорода. Для резки алюминиево-марганцевых сплавов и сплавов типа дуралюмина используют смеси с меньшим содержанием водорода, а также азот и его смеси и воздух.

Плазменно-дуговую резку рационально использовать для легированных сталей толщиной менее 100 мм. Рабочим газом для плазменно-дуговой резки коррозионно-стойкой стали толщиной до 50...60 мм являются кислородсодержащие газы — сжатый воздух или смесь азота с кислородом. Наименьшая шероховатость поверхности реза коррозионно-стойкой стали толщиной 16...40 мм достигается при резке в азотоводородных смесях. При резке стали небольшой толщины затрачивается большое количество азота, что предупреждает образование наплывов на нижней кромке; сталь толщиной более 50...60 мм режут в азотных смесях, содержащих кислород или водород.

Рабочим газом при скоростной безгратовой плазменно-дуговой резке коррозионно-стойких сталей является смесь кислорода, содержащего 20...25 % азота. Резы хромоникелевых сталей, выполненные одним из указанных способов, можно после зачистки металлической щеткой сваривать без дополнительной механической обработки. Если кромки реза будут работать в особо агрессивных средах или при повышенных температурах, интенсифицирующих коррозию, а также если в этих условиях предполагается использование сварных соединений, выполненных по кромкам, подготовленным плазменно-дуговой резкой, предпочтительнее применение аргоноводородных смесей.

В качестве рабочих газов при плазменно-дуговой резке низкоуглеродистых сталей толщиной до 50 мм применяют сжатый воздух, кислород или кислородсодержащие смеси. Стали можно также резать в азоте или в азотно-водородных смесях. При использовании водородсодержащих плазмообразующих смесей плазменно-дуговая резка низкоуглеродистых сталей практически не отличается от резки коррозионно-стойких сталей, однако при этом скорости резки уменьшаются примерно на 20 %. При резке сталей толщиной менее 20 мм в азоте и азотно-водородных смесях качество поверхностей резов низкое.

При резке медных листов и полос мощность дуги должна быть выше, чем при резке сталей. В качестве плазмообразующего газа в этом случае применяют сжатый воздух и азотные смеси с вы-

соким содержанием водорода. Качество поверхностей реза при резке в этих средах одинаковое. Замечено, что при воздушно-плазменной резке меди на поверхности реза образуется легкоудаляемый хрупкий стекловидный грат. Для резки меди небольших и средних толщин предпочтительнее воздушно-плазменная резка при силе тока 350...400 А. Кромки реза медных листов зачищают на глубину 0,8...1,5 мм.

При резке латуни используют те же рабочие газы, что и при резке меди; скорость резки может быть увеличена по сравнению со скоростью резки меди на 25...30 %. При резке на оптимальных режимах кромки реза имеют ровные и гладкие поверхности, не требующие в большинстве случаев механической обработки. В особо ответственных случаях, а также после воздушно-плазменной резки кромки зачищают на глубину до 0,5...1,0 мм.

После плазменно-дуговой резки титана, рекомендуемой только в качестве заготовительной, необходима механическая обработка. Наибольшая производительность достигается при применении азотно-воздушной смеси и чистого азота. Кромки реза получаются ровными, чистыми, без графа и натеков. В металле, прилегающем к кромкам, на глубине 0,1...0,2 мм наблюдается повышенное содержание газов по сравнению с содержанием в основном металле: в 1,5 раза кислорода; в 7—10 раз азота; в 4—8 раз водорода. Оплавленный слой необходимо снимать на глубину 0,3...0,8 мм.

## 7.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ

В состав оборудования для плазменно-дуговой резки входят режущий плазмотрон, пульт газовый с газорегулирующей и измерительной аппаратурой, блок электрооборудования, источник питания, устройство передвижения плазмотрона. Для плазменно-дуговой резки применяются те же типы машин, что и для кислородной резки.

Для достижения высокой стабильности горения дуги и устойчивости процесса резки источник питания должен иметь крутопадающую вольт-амперную характеристику и повышенное напряжение холостого хода (рис. 7.10).

В соответствии с ГОСТ 12221—79 в зависимости от назначения (ручная или механизированная резка) и требований к каче-

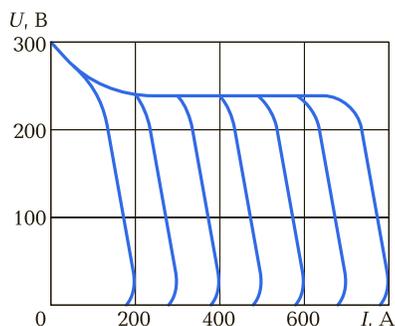


Рис. 7.10. Вольт-амперные характеристики источника тока для плазменно-дуговой резки

ству поверхности отечественная промышленность выпускает универсальную аппаратуру для плазменно-дуговой резки.

В соответствии с правилами техники безопасности ручная аппаратура для плазменно-дуговой резки выпускается на напряжение без нагрузки до 180 В, в оборудовании для механизированной резки используется более высокое напряжение. Напряжение без нагрузки источника определяет диапазон толщин разрезаемого металла; источники с напряжением 180 В позволяют разрезать алюминиевые сплавы толщиной до 80 мм, а медь и сталь — до 60 мм.

Для механизированной воздушно-плазменной резки выпускаются установки «Киев-5», «Киев-6», АПР-404. Источники тока установок «Киев-5» и «Киев-6» выполнены на базе крутопадающей вольт-амперной характеристики, которая обеспечивается системой управления. В промышленности работает также большое количество установок предыдущего поколения: АПР 402 и АПР-403 с дросселями насыщения, которые обеспечивают крутопадающую характеристику.

Для поджигания дежурной дуги в блоке питания имеется источник питания цепи катод — анод высокочастотным разрядом. В комплект поставки установок «Киев-5», «Киев-6» входит резак ВПР-15, в комплект установки АПР-404 входит резак ПВР-402. Установки имеют пульт управления, обеспечивающий контроль и регулировку энергетических и газовых параметров.

Для ручной воздушно-плазменной резки применяется *мобильный агрегат воздушно-плазменной резки (МАВР)*, который позволяет проводить резку низкоуглеродистых, коррозионно-стойких сталей, алюминия и других металлов в широком диапазоне тол-

щин. Источник питания МАВР-150 выполнен на основе схемы высокочастотного транзисторного инвертора. Далее приведены технические характеристики источника питания МАВР-150:

Входное напряжение, В .....	380
Диапазон выходных токов, А:	
I ступень .....	50
II ступень .....	100
III ступень .....	150
Потребляемая мощность, кВт · А, не более .....	25
Толщина реза, мм .....	50
Коэффициент мощности .....	0,91
Периодичность включения при 10-минутном цикле и токе 150 А, % .....	60
Масса, кг .....	45

Ручную плазменно-дуговую резку применяют в основном при резке металла небольшой толщины. В комплект поставки установок входят плазморез, кабель-шланговый пакет, коллектор и зажималка. Кнопки включения тока дуги, вентили и рычаги подачи плазмообразующего газа монтируют на рукоятке режущего плазмотрона. Режущая дуга возбуждается кратковременным замыканием электропроводящим стержнем промежутка катод—сопло. Аппаратура этого типа работает от источников питания ВКС-500, ВДГ-501, выпускаемых для дуговой сварки, или вращающихся сварочных преобразователей ПСО-500 и др.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В чем сущность плазменной резки?
2. В каких средах осуществляется плазменная резка?
3. Назовите основные элементы конструкции плазмотронов для резки.
4. В чем состоит особенность плазменной резки?
5. Какие материалы подвергаются плазменной резке?

### **Составы, обозначения и области применения газовых смесей**

Рассмотрим составы газовых смесей, чаще всего применяемых при дуговой сварке в защитном газе.

*Защитные газовые смеси для сварки плавящимся электродом:*

- газовая смесь К-2 (Pureshield P31). Наиболее универсальная из всех смесей для углеродисто-конструкционных сталей. Состоит из 82 % аргона и 18 % углекислого газа. Подходит практически для всех типов материалов;

- газовая смесь К-3.1 (Argoshield 5). Состоит из 92 % аргона, 6 % углекислого газа и 2 % кислорода. Разработана для сварки листовых и узкопрофильных (сортовых) сталей. Дает устойчивую дугу с низким уровнем разбрызгивания и плоским гладким профилем сварного шва. Смесь обеспечивает глубокое проплавление и идеально подходит для сварки листового металла;

- газовая смесь К-3.2 (Argoshield TC). Состоит из 86 % аргона, 12 % углекислого газа и 2 % кислорода. Дает устойчивую дугу с широкой зоной нагрева и хорошим проваром профиля, подходит для глубокого проплавления, сварки коротких швов и для наплавки. Может использоваться для сварки во всех пространственных положениях. Идеально подходит для полуавтоматической (ручной), автоматической и роботизированной сварки;

- газовая смесь К-3.3 (Argoshield 20). Состоит из 78 % аргона, 20 % углекислого газа и 2 % кислорода. Специально разработана для глубокого проплавления широкого ассортимента профилей. Хорошо подходит для наплавки и сварки толстых прокатных (сортовых) сталей;

- газовая смесь НП-1 (Helishield H1). Состоит из 85 % гелия, 13,5 % аргона и 1,5 % углекислого газа. Дает великолепные чистые швы с гладким профилем и незначительное (либо не дает совсем) окисление поверхности. Идеально подходит для тонких материалов, когда высокая скорость прохода дает низкий уровень деформации (искривления) металла;

- газовая смесь НП-2 (Helishield H7). Состоит из 55 % гелия, 43 % аргона и 2 % углекислого газа. Придает низкий уровень сварочному армированию и обеспечивает высокую скорость сварки. Хорошо подходит для автоматической сварки и применения роботов-автоматов с использованием широкого спектра толщин свариваемых материалов;

- газовая смесь НП-3 (Helishield H101). Состоит из 38 % гелия, 60 % аргона и 2 % углекислого газа. Придает стабильность дуге, что обеспечивает низкий уровень разбрызгивания и снижает вероятность появления дефектов шва. Смесь рекомендуется для сварки материалов толщиной более 9 мм.

*Защитные газовые смеси для сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом:*

- газовая смесь НН-1 (Helishield H3). Инертная газовая смесь, состоящая из 30 % гелия и 70 % аргона. Смесь дает более эффективный нагрев, чем аргон. Увеличиваются проплавление и скорость сварки. Получается более ровная поверхность шва и, следовательно, меньшее использование сварочной проволоки;

- газовая смесь НН-2 (Helishield H5). Инертная газовая смесь, состоящая из 50 % гелия и 50 % аргона. Наиболее универсальная газовая смесь, подходит для сварки материалов практически любой толщины;

- газовая смесь НН-3 (Helishield H2). Инертная газовая смесь, состоящая из 70 % гелия и 30 % аргона, наиболее применима для сварки тонких материалов. Высокое содержание гелия предоставляет более продуктивную сварочную дугу. Использование этой смеси для сварки тонких материалов может существенно сократить пористость, увеличить скорость сварки и уменьшить (возможно, полностью устранить) необходимость подогрева.

В табл. П.1 приведены газовые сварочные смеси и рекомендуемая область их применения, в табл. П.2 — рекомендуемые защитные газовые смеси для сварки плавящимся электродом в зависимости от типа и толщины металла, а в табл. П.3 — обозначения газовых смесей, принятые в Европе.

Т а б л и ц а П.1

**Газовые сварочные смеси и рекомендуемые области их применения**

Состав газовой сварочной смеси	Свариваемые материалы	Область применения
(80...95) % Ar + + (20...5) % CO <sub>2</sub>	Углеродистые и легированные конструкционные стали	Капельный или струйный перенос электродного металла. Стабильность дуги. Сварка металлов широкого спектра толщин
92 % Ar + 6 % CO <sub>2</sub> + + 2 % O <sub>2</sub>	Углеродистые и легированные конструкционные стали	Капельный или струйный перенос электродного металла. Идеально подходит для сварки металлов малых толщин
85 % He + + 13,5 % Ar + + 1,5% CO <sub>2</sub>	Легированные и углеродистые конструкционные стали	Сварка пульсирующей дугой. Дает чистые швы с гладким профилем с незначительным окислением поверхности. Применяется для тонких материалов, где высокая скорость сварки дает низкий уровень деформации металла
55 % He + 43 % Ar + + 2% CO <sub>2</sub>	Легированные и углеродистые конструкционные стали	Низкий уровень альфирования металла шва и околошовной зоны. Подходит для широкого спектра толщин

Состав газовой сварочной смеси	Свариваемые материалы	Область применения
38 % He + 60 % Ar + + 2% CO <sub>2</sub>	Легированные и углеродистые конструкционные стали	Капельный или струйный перенос электродного металла. Придает стабильность дуге, что обеспечивает низкий уровень разбрызгивания и снижает вероятность появления дефектов в металле шва
70 % Ar + 30 % He	Цветные металлы и их сплавы. Средне- и высоколегированные стали	Инертная газовая смесь. Обеспечивает более эффективный нагрев, чем при защите чистым аргоном. Увеличивает скорость сварки. Обеспечивает глубокий провар, низкую пористость и ровную поверхность сварного шва
50 % Ar + 50 % He	Цветные металлы и их сплавы. Средне- и высоколегированные стали	Инертная, наиболее универсальная газовая смесь для сварки материалов любой толщины
30 % Ar + 70 % He	Цветные металлы и их сплавы. Средне- и высоколегированные стали	Инертная смесь для сварки толстых материалов. Позволяет существенно увеличить скорость сварки, уменьшить пористость и снизить температуру сопутствующего подогрева. Обеспечивает получение швов с более глубоким проплавлением по сравнению с чистым аргоном

## Рекомендуемые защитные газовые смеси для сварки плавящимся электродом

Свариваемый металл	Толщина, мм	Рекомендуемая смесь	Диаметр сварочной проволоки, мм	Скорость сварки, мм/мин	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Расход газа, л/мин
Углеродистые конструкционные стали	1,0	К-3.1	0,8	350...600	45...65	14...15	3,5...4,0	12
	1,5	К-3.1	0,8	400...600	70...80	15...16	4,0...5,3	14
	3,0	К-3.2	1,0	280...520	120...160	17...19	4,0...5,2	15
	6,0	К-3.2	1,0	300...450	140...160	17...18	4,0...5,0	15
	6,0	К-3.2	1,2	420...530	250...270	26...28	6,6...7,3	16
	10,0	К-3.2	1,2	300...450	140...160	17...18	3,2...4,0	15
	10,0	К-2	1,2	400...480	270...310	26...28	7,0...7,8	16
	Более 10,0	К-2	1,2	300...450	140...160	17...18	3,2...4,0	15
	Более 10,0	К-3.3	1,2	370...440	290...330	28...31	10,0...12,0	17
	1,6	НП-1	0,8	410...600	70...85	19...20	6,5...7,1	12
	3,0	НП-2	1,0	400...600	100...125	16...19	5,0...6,0	13
Легированные стали	6,0	НП-2	1,0	280...520	120...150	16...19	4,0...6,0	14
	6,0	НП-2	1,2	500...650	220...250	25...29	7,0...9,0	14
	10,0	НП-3	1,2	250...450	120...150	16...19	4,0...6,0	14

Свариваемый металл	Толщина, мм	Рекомендуемая смесь	Диаметр сварочной проволоки, мм	Скорость сварки, мм/мин	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Расход газа, л/мин
	10,0	НП-3	1,2	450...600	260...280	26...30	8,0...9,5	14
	Более 10,0	НП-3	1,2	220...400	120...150	16...19	4,0...6,0	15
	Более 10,0	НП-3	1,2	400...600	270...310	28...31	9,0...10,0	15
	1,6	НН-1	1,0	450...600	70...100	17...18	4,0...6,0	14
	3,0	НН-1	1,2	500...700	105...120	17...20	5,0...7,0	14
Алюминий и его сплавы	6,0	НН-1	1,2	450...600	120...140	20...24	6,5...8,5	14
	6,0	НП-2	1,2	550...800	160...200	27...30	8,0...10,0	14
	10,0	НП-2	1,2	450...600	120...140	20...24	6,5...8,5	16
	10,0	НП-2	1,6	500...700	240...300	29...32	7,0...9,0	16
	Более 10,0	НП-2	1,2...1,6	400...500	130...200	20...26	6,5...8,0	18
	Более 10,0	НП-3	1,6...2,4	450...700	300...500	32...40	9,0...14,0	18

Таблица П.3

**Обозначения газовых смесей, принятые в Европе**

Смесь	Состав	Классификация BS EN 439	Обозначения в тексте
Argoshield 5	Ar + 5 % CO <sub>2</sub> + 2 % O <sub>2</sub>	M 14	К-3.1
Argoshield TC	Ar + 12 % CO <sub>2</sub> + 2 % O <sub>2</sub>	M 24	К-3.2
Argoshield 20	Ar + 20 % CO <sub>2</sub> + 2 % O <sub>2</sub>	M 24	К-3.3
Pureshield Argon	Ar	I1	–
Pureshield P1	Ar + 1,5 % H <sub>2</sub>	R1	–
Pureshield P2	Ar + 35 % H <sub>2</sub>	R2	–
Pureshield P3	Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	M21	К-2
Pureshield P4	Ar + 5 % H <sub>2</sub>	R1	–
Pureshield P5	Ar + 2,5 % N <sub>2</sub>	S1 + 2,5 % N <sub>2</sub>	–
Helishield H1	He + 13,5 % Ar + 1,5 % CO <sub>2</sub>	M 12(3)	НП-1
Helishield H2	Ar + 75 % He	I3	НН-3
Helishield H3	Ar + 30 % He	I3	НН-1
Helishield H4	Ar + 11 % He + 4 % H <sub>2</sub>	R1(1)	–
Helishield H5	Ar + 50 % He	I3	НН-2
Helishield H7	Ar + 55 % He + 2 % CO <sub>2</sub>	M 12(2)	НП-2
Helishield H101	Ar + 38 % He + 2 % CO <sub>2</sub>	M 12(2)	НП-3
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	C 1	–

## Список литературы

1. *Маслов В. И.* Сварочные работы : учеб. пособие / В. И. Маслов. — 6-е изд., стер. — М. : Изд. центр «Академия», 2007. — 240 с.
2. *Полевой Г. В.* Пламенная и газотермическая обработка материалов : учебник / Г. В. Полевой, Г. К. Сухинин. — М. : Машиностроение, 1992. — 336 с.
3. *Овчинников В. В.* Газорезчик : учеб. пособие / В. В. Овчинников. — М. : Изд. центр «Академия», 2007. — 64 с. — (Непрерывное профессиональное образование. Сварщик).
4. *Овчинников В. В.* Электросварщик ручной дуговой сварки (сварка покрытыми электродами) : учеб. пособие / В. В. Овчинников. — М. : Изд. центр «Академия», 2007. — 64 с. — (Непрерывное профессиональное образование. Сварщик).
5. *Овчинников В. В.* Электросварщик ручной дуговой сварки (дуговая сварка в защитных газах) : учеб. пособие / В. В. Овчинников. — М. : Изд. центр «Академия», 2007. — 64 с. — (Непрерывное профессиональное образование. Сварщик).

# Оглавление

Предисловие .....	4
<b>Глава 1. Сварные соединения, выполняемые ручной дуговой и плазменной сваркой .....</b>	<b>6</b>
1.1. Виды соединений .....	6
1.2. Типы сварных швов .....	16
1.3. Параметры сварных швов .....	25
1.4. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений .....	28
<b>Глава 2. Электрическая дуга .....</b>	<b>32</b>
2.1. Электрическая дуга и ее строение .....	32
2.2. Типы сварочных дуг .....	39
2.3. Дуга в защитных газах .....	41
2.4. Параметры режима дуговой сварки .....	43
2.5. Плавление и перенос электродного материала .....	48
2.6. Плавление основного металла .....	50
2.7. Структура сварного соединения .....	53
<b>Глава 3. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами .....</b>	<b>58</b>
3.1. Схема процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами .....	58
3.2. Покрытые электроды для дуговой сварки .....	59
3.3. Технологические параметры процесса плавления электродов .....	66
3.4. Классификация и условные обозначения электродов .....	68
3.5. Электроды для сварки цветных металлов и чугуна .....	72
3.6. Упаковка и хранение электродов .....	73
3.7. Подготовка деталей под сварку .....	74
3.8. Выбор режима при сварке покрытыми электродами .....	79
3.9. Способы выполнения швов .....	80

3.10. Особенности сварки в различных пространственных положениях .....	87
<b>Глава 4. Ручная дуговая сварка в защитных газах .....</b>	<b>90</b>
4.1. Классификация процессов ручной сварки в защитных газах .....	90
4.2. Создание газовой защиты .....	92
4.3. Материалы, применяемые при дуговой сварке в защитных газах .....	95
4.4. Техника ручной дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом .....	104
4.5. Техника плазменной сварки .....	115
4.6. Техника сварки плавящимся электродом в защитных газах .....	117
<b>Глава 5. Технология ручной дуговой сварки конструкционных материалов .....</b>	<b>138</b>
5.1. Сварка сталей .....	138
5.2. Сварка чугуна .....	147
5.3. Сварка алюминия и его сплавов .....	150
5.4. Сварка магниевых сплавов .....	158
5.5. Сварка титана и его сплавов .....	164
5.6. Сварка меди и ее сплавов .....	168
5.7. Сварка никеля и его сплавов .....	172
<b>Глава 6. Оборудование для ручной дуговой сварки .....</b>	<b>176</b>
6.1. Оборудование поста для ручной дуговой сварки покрытыми электродами .....	176
6.2. Общие характеристики источников питания для ручной дуговой сварки покрытыми электродами .....	180
6.3. Установка для ручной аргонодуговой сварки .....	184
6.4. Схема поста для дуговой сварки плавящимся электродом .....	186
6.5. Газовая аппаратура для сварки в защитных газах .....	189
6.6. Источники питания для дуговой сварки в защитных газах .....	192
<b>Глава 7. Дуговые методы резки .....</b>	<b>205</b>
7.1. Кислородно-дуговая и воздушно-дуговая резка .....	205
7.2. Плазменно-дуговая резка .....	208
7.3. Плазмообразующие среды .....	210
7.4. Режущие плазмотроны .....	212

7.5. Технологические особенности резки .....	217
7.6. Оборудование для плазменно-дуговой резки .....	223
Приложение .....	226
Список литературы .....	232

*Учебное издание*

**Овчинников Виктор Васильевич**

**Технология ручной дуговой и плазменной сварки  
и резки металлов**

**Учебник**

5-е издание, стереотипное

Редакторы *Г. Н. Сидорова, И. В. Мочалова*  
Технический редактор *Н. И. Горбачёва*  
Компьютерная верстка: *Л. М. Беляева*  
Корректор *Г. Е. Форысенкова*

Изд. № 705213888. Подписано в печать 21.11.2016. Формат 60 × 90 / 16.  
Гарнитура «Балтика». Усл. печ. л. 15,0.

ООО «Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.  
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU.ПЩ01.Н00695 от 31.05.2016.



# Издательский центр «Академия»

---

*Учебная литература  
для профессионального  
образования*

---

**Предлагаем  
вашему вниманию  
следующие книги:**

В. В. ОВЧИННИКОВ

## **ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗОВОЙ СВАРКИ И РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**

Объем 240 с.

Учебник предназначен для изучения предмета «Технология газовой сварки и резки металлов» и является частью учебно-методического комплекта по профессии «Сварщик». Изложены общие сведения о газовой сварке и резке металлов. Описана технология сварки цветных металлов и сплавов. Рассмотрено оборудование, применяемое при газовой сварке и резке.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

М. Д. БАНОВ, Ю. В. КАЗАКОВ,

М. Г. КОЗУЛИН и др.

## **СВАРКА И РЕЗКА МАТЕРИАЛОВ**

Объем 400 с.

В учебном пособии приведены общие сведения о сварке, сварных соединениях и швах. Рассмотрены различные способы сварки, сборочно-сварочные приспособления и оборудование, применяемое при сварке, методы контроля сварных соединений. Описаны способы резки металлов и сплавов. Освещены вопросы техники безопасности.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезно рабочим сварочного производства.

---

---

Г. Г. ЧЕРНЫШОВ, Г. В. ПОЛЕВОЙ, А. П. ВЫБОРНОВ и др.  
**СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРОГАЗОСВАРЩИКА  
И ГАЗОРЕЗЧИКА**

Объем 400 с.

В учебном пособии приведены данные об основных процессах, протекающих при сварке, о конструктивных элементах сварных соединений и швов, способах и критериях оценки свариваемости. Представлена подробная информация о современных материалах, оборудовании, различных способах сварки и термической резки сталей, цветных металлов и сплавов. Содержит сведения, необходимые для аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть использовано при подготовке рабочих.

Г. Г. ЧЕРНЫШОВ  
**ОСНОВЫ ТЕОРИИ СВАРКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ  
МЕТАЛЛОВ**

Объем 208 с.

Учебник предназначен для изучения предмета «Основы теории сварки и термической резки металлов» и является частью учебно-методического комплекта по профессии «Сварщик». Приведены данные о конструктивных элементах сварных соединений, швах, физических процессах, протекающих при сварке и резке металлов разными способами. Рассмотрены основные металлорежущие процессы и особенности возникновения напряжений и деформаций при сварке и резке металлов, методы оценки свариваемости металлов, дефекты сварных соединений и вопросы контроля качества сварных соединений. Представлены сведения, необходимые для аттестации сварщиков.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

Г. Г. ЧЕРНЫШОВ  
**СВАРОЧНОЕ ДЕЛО: СВАРКА И РЕЗКА МЕТАЛЛОВ**

Объем 496 с.

В учебнике приведены подробные сведения о дуговой, электрошлаковой и газовой сварке, термической резке металлов, сварочном оборудовании и материалах, технологии сварки сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов. Изложены методы неразрушающего контроля сварных соединений. В 4-м издании в соответствии с ОСТ 9 ПО 02.2.4—2003 «Сварщик (электросварочные и газосварочные работы)» переработаны главы 3—6 и 21 и дополнительно представлена информация сварочных материалов согласно ISO, EN, AWS и DIN.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

**[www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)**

---



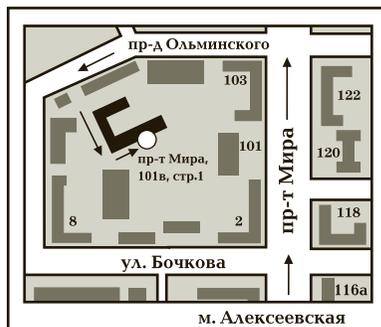
# Издательский центр «Академия»

*Учебная литература  
для профессионального  
образования*

**Наши книги можно приобрести (оптом и в розницу)**

## Москва

129085, Москва, пр-т Мира, д.101в, стр. 1  
(м. Алексеевская)  
Тел.: (495) 648-0507, факс: (495) 616-0029  
E-mail: sale@academia-moscow.ru

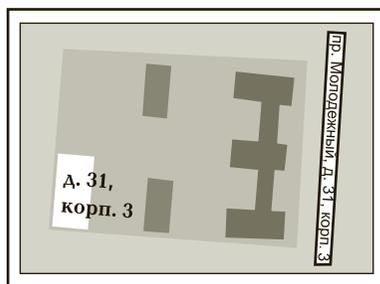


## Филиалы:



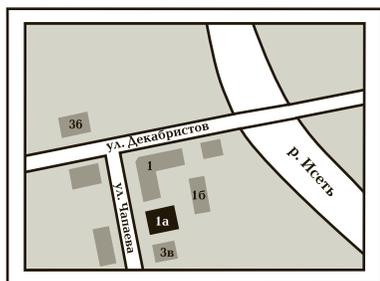
## Северо-Западный

194044, Санкт-Петербург,  
ул. Чугунная, д. 14, оф. 319  
Тел./факс: (812) 244-92-53  
E-mail: spboffice@acadizdat.ru



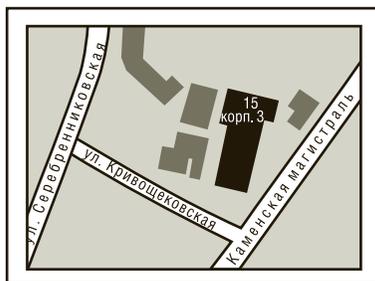
## Приволжский

603101, Нижний Новгород,  
пр. Молодежный, д. 31, корп. 3  
Тел./факс: (831) 259-7431,  
259-7432, 259-7433  
E-mail: pf-academia@bk.ru



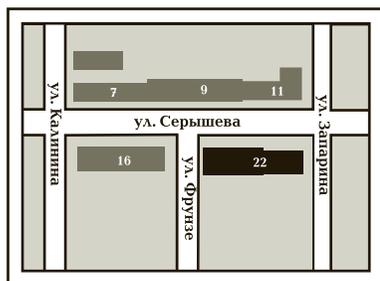
### Уральский

620142, Екатеринбург, ул. Чапаева,  
д. 1а, оф. 12а  
Тел.: (343) 257-1006  
Факс: (343) 257-3473  
E-mail: academia-ural@mail.ru



### Сибирский

630007, Новосибирск,  
ул. Кривощёковская, д. 15, корп. 3  
Тел./факс: (383) 362-2145, 362-2146  
E-mail: academia\_sibir@mail.ru



### Дальневосточный

680038, Хабаровск, ул. Серышева,  
д. 22, оф. 519, 520, 523  
Тел./факс: (4212) 56-8810  
E-mail: filialdv-academia@yandex.ru



### Южный

344082, Ростов-на-Дону,  
ул. Пушкинская, д. 10/65  
Тел.: (863) 203-5512  
Факс: (863) 269-5365  
E-mail: academia-UG@mail.ru

### Представительства:

#### в Республике Татарстан

420034, Казань, ул. Горсоветская,  
д. 17/1, офис 36  
Тел./факс: (843) 562-1045  
E-mail: academia-kazan@mail.ru

#### в Республике Дагестан

Тел.: 8-928-982-9248

