

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

---

**А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов**

**СВАРКА СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ  
ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ.  
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО**

Монография

Издательство  
Томского политехнического университета  
2012

УДК 621/791/75

ББК 34.641

П64

**Потапьевский А.Г.**

П64 Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 208 с.

ISBN 978-5-4387-0171-2

В монографии описаны современные способы сварки в защитных газах плавящимся электродом, особенности дуги и переноса электродного металла, управления процессами сварки. Рассмотрены особенности металлургических реакций при сварке сталей в углекислом газе. Даны рекомендации по выбору электродных проволок для сварки сталей, чугуна и оцинкованной стали. Описаны техника и технология сварки в CO<sub>2</sub> и смесях аргона с CO<sub>2</sub> швов во всех пространственных положениях, рекомендации по повышению производительности и уменьшению разбрызгивания. Приведены сведения о сварочном оборудовании, источниках питания и системах обеспечения сварочных производств защитными газами, технике безопасности.

Книга предназначена для инженерно-технических работников сварочного производства, технологов и конструкторов, а также может быть полезна учащимся средних и высших технических учебных заведений.

**УДК 669.15-194**

**ББК 34.641**

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения

*Н.Г. Дюргеров*

Кандидат технических наук заведующий отделом проблем техники и технологии дуговой сварки ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

*В.М. Илющенко*

ISBN 978-5-4387-0171-2

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ Юргинский технологический институт (филиал), 2012  
© Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А., 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ</b> .....	<b>7</b>
1.1. Защитные газы для сварки сталей в защитных газах.....	7
1.2. Дуга в защитных газах с плавящимся электродом.....	11
1.3. Виды процессов сварки .....	22
1.4. Перенос электродного металла и управление переносом .....	31
<b>ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ СТАЛЕЙ</b> .....	<b>55</b>
2.1. Сварка в CO <sub>2</sub> тонкой проволокой 0,5–1,4 мм .....	55
2.2. Особенности сварки проволоками сплошного сечения диаметром 1,6–2,5 мм.....	59
2.3. Сварка в смесях газов.....	62
2.4. Сварка порошковыми (газозащитными) проволоками в CO <sub>2</sub> .....	65
2.5. Влияние различных факторов на стабильность процесса сварки и разбрызгивание электродного металла .....	66
<b>ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В CO<sub>2</sub> КОРОТКОЙ ДУГОЙ</b> .....	<b>70</b>
3.1. Способы стабилизации и уменьшения разбрызгивания электродного металла процесса сварки короткой дугой.....	70
3.2. Устройства токоограничения и стабилизации процесса сварки короткой дугой .....	76
3.3. Разработка методов и устройств стабилизации процесса сварки короткой дугой .....	80
3.4. Способы стабилизации процесса сварки короткой дугой.....	88
3.5. Устройство импульсных стабилизаторов (ИС) .....	91
<b>ГЛАВА 4. ТЕХНИКА СВАРКИ ШВОВ ВО ВСЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ</b> .....	<b>97</b>
4.1. Эффективность газовой защиты зоны сварки .....	97
4.2. Параметры режима сварки .....	99
4.3. Сборка и особенности сварки основных типов соединений.....	102
4.4. Особенности приварки болтов и шпилек.....	115
<b>ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА</b> ...	<b>117</b>
5.1. Особенности металлургических процессов при сварке сталей .....	117
5.2. Технология сварки и наплавки сталей .....	123
5.3. Технология сварки, наплавки, и ремонта изделий из чугуна.....	126
5.4. Сварка нержавеющей и кислотостойких сталей .....	127
<b>ГЛАВА 6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ</b> .....	<b>132</b>
6.1. Традиционные источники питания для дуговой сварки в защитных газах .....	140

6.2. Источники питания для дуговой сварки в защитных газах инверторного типа .....	145
6.3. Конверторные (чопперные) источники питания .....	150
6.4. Рекомендации по практическому применению и настройке процессов сварки с короткими замыканиями дугового промежутка .....	151
6.5. Оборудование для сварки в защитных газах .....	153
<b>ГЛАВА 7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....</b>	<b>180</b>
<b>ГЛАВА 8. АТТЕСТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И СЕРТИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ .....</b>	<b>187</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>189</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>198</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Сварка в защитных газах является наиболее массовым способом сварки. В конце XIX века русский инженер Николай Николаевич Бенардос применил сварку угольным электродом с защитой зоны сварки углеродистым газом. В 20-х годах в США инженер Александер и физик Лэнгмюр осуществили сварку дугой косвенного действия с неплавящимися вольфрамовыми электродами в водороде сведения о сварке в инертном газе вольфрамовым электродом появились в начале 40-х годов [1]. В Советском Союзе в конце 40-х годов были разработаны сварка плавящимся и неплавящимся электродом в аргоне. В 1951 году в институте электросварки была применена сварка в углекислом газе угольным электродом. В 1952 году в ЦИННТМАШ К.В. Любавский и Н.М. Новожилов получили авторское свидетельство на сварку в  $\text{CO}_2$  плавящем электродом и разработали металлургические основы этого процесса сварки. В 1955–58 гг. в институте электросварки им. Е.О. Патона Д.А. Дудко, И.И. Зарубой, А.Г. Потапьевским был разработан процесс сварки в  $\text{CO}_2$  тонкой проволокой ( $\varnothing 0,5 - 1,2$  мм) с принудительным коротким замыканием. В 1962–63 гг. под руководством Б.Е. Патона были разработаны основные виды импульсно-дуговой сварки в аргоне и смесях  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  и  $\text{Ar} + \text{He}$ . Разработали технологические рекомендации по сварке сталей и цветных металлов во всех пространственных положениях, аппаратуру для реализации сварки, организовали серийное изготовление аппаратуры, тонких проволок и рекомендации по обеспечению  $\text{CO}_2$  промышленных предприятий. Это обеспечило быстрое и широкое применение сварки в углекислом газе тонкой проволокой в промышленности.

Процесс сварки в углекислом газе, как и многочисленные модификации этого процесса, основанные на применении различных газовых смесей на его основе, обладает бесспорными преимуществами перед другими способами сварки:

- широкая возможность механизации и автоматизации процесса;
- отсутствие необходимости применения флюсов или покрытий;
- возможность получения качественных соединений металлов и сплавов, разных марок и толщин при различной конфигурации швов и расположения их в пространстве;
- малая зона термического влияния и относительно небольшие деформации изделий в связи с высокой концентрацией энергии дуги;
- доступность наблюдения за процессом сварки;
- быстрое освоение сварки во всех пространственных положениях.

Однако, наряду с вышеперечисленными достоинствами, процессу сварки в углекислом газе в диапазоне средних токов (200 – 350 А) характерны и недостатки, главными из которых являются крупнокапельный перенос электродного металла при использовании серийных проволок типа Св-Г2С и повышенное разбрызгивание электродного металла. Перечисленные недостатки технологического процесса сварки в углекислом газе инициировали многочисленные исследования, направленные на их устранение. Следует заметить, что различные организации бывшего Советского Союза и за рубежом по разному подходили к их устранению. Если за рубежом в основном совершенствовали технологические процессы основанные на применении смесей газов, то в России и на Украине, где были сосредоточены основные исследовательские центры в области сварки и родственных технологий, поставленная задача решалась на основе совершенствования микрометаллургических процессов сварки, использования систем стабилизации и управления процессами плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну.

Сегодня, в связи с широкомасштабными интеграционными процессами, происходящими в мире, эти направления совершенствования технологических процессов сварки в защитных газах, объединены и рассмотрены в рамках предлагаемой монографии, которая по-нашему мнению будет весьма полезна широкому кругу специалистов, занятых в сфере сварочного производства.

## ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

### 1.1. Защитные газы для сварки сталей в защитных газах

При дуговой сварке для защиты зоны сварки используют активные и инертные газы.

**Активными** называют газы, взаимодействующие с расплавленным металлом шва. К ним относят углекислый газ и смеси аргона с углекислым газом и кислородом. К **инертным** газам относят аргон, гелий и их смеси, не взаимодействующие с расплавленным металлом.

**Углекислый газ.** Углекислый газ газообразная двуокись углерода. Для получения качественных швов используется газообразная и жидкая двуокись углерода высшего и первого сорта изготавливаемая по ГОСТ 8050-85 (табл. 1.1). Углекислый газ – газ без цвета и запаха. При температуре 20 °С и давлении 101,3 кПа (760 мм. рт. ст.) плотность – 1,839 кг/м<sup>3</sup>. Плотность по отношению к воздуху составляет – 1,524.

Жидкая двуокись углерода – бесцветная жидкость без запаха. Жидкую двуокись углерода выпускают двух видов: высокого давления от 3482 до 7383 кПа (критическое давление) при температуре от 0 до +31,05 °С и низкотемпературную давлением от 518,6 до 3482 кПа (тройная точка) хранящуюся при температурах от минус 56,5 до 0 °С.

Жидкая двуокись углерода высокого давления при температуре ниже +11 °С тяжелее воды, а выше +11 °С – легче. Плотность жидкой углекислоты значительно изменяется с изменением температуры. Поэтому количество углекислоты определяют и продают по массе. Углекислоту для целей сварки выпускают и транспортируют в стальных 40 литровых баллонах в жидком состоянии при давлении 7000–7100 кПа и в изотермических емкостях в переохлажденном состоянии при давлении 18–20 кПа.

Таблица 1.1

*Состав газообразной и жидкой двуокиси углерода, изготавливаемой по ГОСТ 8050-85*

Показатели	Высший сорт	1-й сорт
Объемная доля двуокиси углерода (CO <sub>2</sub> ), %, не менее	99,8	99,5
Массовая концентрация масел и механических примесей, мг/кг, не более	0,1	0,1
Массовая доля воды, %, не более	отсутствует	
Массовая концентрация водяных паров при +20 °С и давлении 101,3 кПа, г/см <sup>3</sup>	0,037	0,184

При подводе тепла жидкая углекислота превращается в газ. При испарении 1 кг жидкой углекислоты образуется 509 литров газа. В 40 литровой баллон заливают 25 кг жидкой углекислоты, при ее испарении образуется 12500 литров углекислого газа.

**Смеси защитных газов.** На практике для сварки плавящимся электродом применяют смеси газов, состав которых выбирают в зависимости от состава свариваемого металла и требований, предъявляемых к сварным швам. Рекомендации по составу смесей газов, применяемых на практике, приведены ниже в разделах по сварке конкретных металлов.

В зарубежной практике составы защитных газов для сварки определены нормами EN 439 (табл. 1.2).

**Смеси аргона с углекислым газом и кислородом.** Для дуговой сварки плавящимся электродом углеродистых сталей наиболее широко применяются смеси аргона с 20–25 % углекислого газа. Реже применяются смеси аргона с 8–15 % углекислого газа, смеси аргона с добавкой углекислого газа и кислорода. Чистый аргон для сварки плавящимся электродом углеродистых сталей не пригоден, так как в швах образуются поры. Для получения плотных швов на углеродистых сталях защитный газ должен содержать окислители. Смеси газов поставляют в стальных 40-литровых баллонах при давлении 150 кПа. В 40 литровом баллоне при 150 кПа содержится 6000 литров смеси. Смеси газов поставляют также в изотермических емкостях, в которых аргон, углекислый газ и кислород находятся в сжиженном переохлажденном состоянии. Смеси получают также непосредственно на заводах потребителях смешиванием газов из отдельных баллонов, используя смесители газов. В одном баллоне аргона содержится 6000 литров газа. Для получения смесей используют аргон, изготавливаемый по ГОСТ 10157-79 (табл. 1.3) высшего или первого сорта и кислород 1-го 2-го сорта по ГОСТ 5583-78 (табл. 1.4).

**Смеси аргона с кислородом** используются для сварки легированных сталей. Содержание кислорода в смесях устанавливают в зависимости от типа сталей в пределах 1–10%. Поставляют смеси в 40 литровых баллонах при давлении 150 кПа или получают путем смешивания аргона с кислородом из отдельных баллонов с помощью постовых смесителей газа.

Таблица 1.2

## Составы некоторых газовых смесей, используемых при сварке

Условные обозначения	Объемное содержание, %					
	Окислительные		Инертные		Пассивный **	Восстановительный
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
R1 R2	-	-	остальное*	До 15 До 15	-	До 15
I1 I2 I3	-	-	100 - Остальное	- 100 До 95	-	-
M1-1 M1-2 M1-3 M1-4	До 5 До 5 - До 5	- - До 3 До 3	Остальное	-	-	До 5
M2-1 M2-2 M2-3 M2-4	От 5 до 25 - До 5 От 5 до 25	- От 3 до 10 От 3 до 10 До 8		-	-	-
M3-1 M3-2 M3-3	от 25 до 50 - от 5 до 50	- До 15 От 8 до 15		-	-	-
C1 C2	100 Остальное	- До 30		-	-	-

\* Аргон на 95% может быть заменен гелием.  
\*\* Азот инертен по отношению к меди.

Таблица 1.3

## Состав газообразного и жидкого аргона в %, изготавливаемого согласно ГОСТ 10157-79

Показатели	Высший сорт	1-й сорт
Объемная доля аргона, %, не менее	99,993	99,987
Объемная доля кислорода, %, не более	0,0007	0,002
Объемная доля азота, %, не более	0,005	0,01
Массовая концентрация водяного пара при +20°C и давлении 101,3 кПа (760 мм.рт.ст.), г/м <sup>3</sup> , не более	0,007	0,01
Объемная доля суммы углеродосодержащих, соединений в пересчете на СО, %, не более	0,0005	0,001

Таблица 1.4

*Состав газообразного технического кислорода в %, изготавливаемый по ГОСТ 5583-78*

Показатели	1-й сорт	2-й сорт
Объемная доля кислорода, %, не менее	99,7	99,5
Массовая концентрация водяных паров при +20 °С и давлении 101,3 кПа (760 мм.рт.ст.), г/м <sup>3</sup> , не более	0,05	0,07
Объемная доля водорода, %, не более	0,3	0,5
Объемная доля двуокиси углерода, %, не более	не нормируется	
Содержание оксида углерода	не нормируется	

**Смеси аргона с гелием и кислородом** или аргона с гелием и углекислым газом используют для сварки легированных сталей. Гелий - бесцветный газ, без запаха и вкуса, не ядовитый, значительно легче воздуха и аргона (табл. 1.5). Поставляют смеси в 40 литровых баллонах при давлении 150 кПа или получают путем смешивания аргона с гелием и кислородом с использованием постовых смесителей газа. В этом случае применяют гелий высокой чистоты или сорта А и кислород 1-го или 2-го сорта по ГОСТ 5583-78.

Таблица 1.5

*Состав гелия, используемого для сварки, %, не менее*

Сорт	He	H <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Высокой чистоты	99,985	0,0025	0,005	0,002
А	99,95	0,008	0,020	0,005

## 1.2. Дуга в защитных газах с плавящимся электродом

При сварке плавящимся электродом источником энергии, обеспечивающим плавление электродного и основного металлов, является электрическая дуга. Основные сведения о дуге приведены в работах [2, 3].

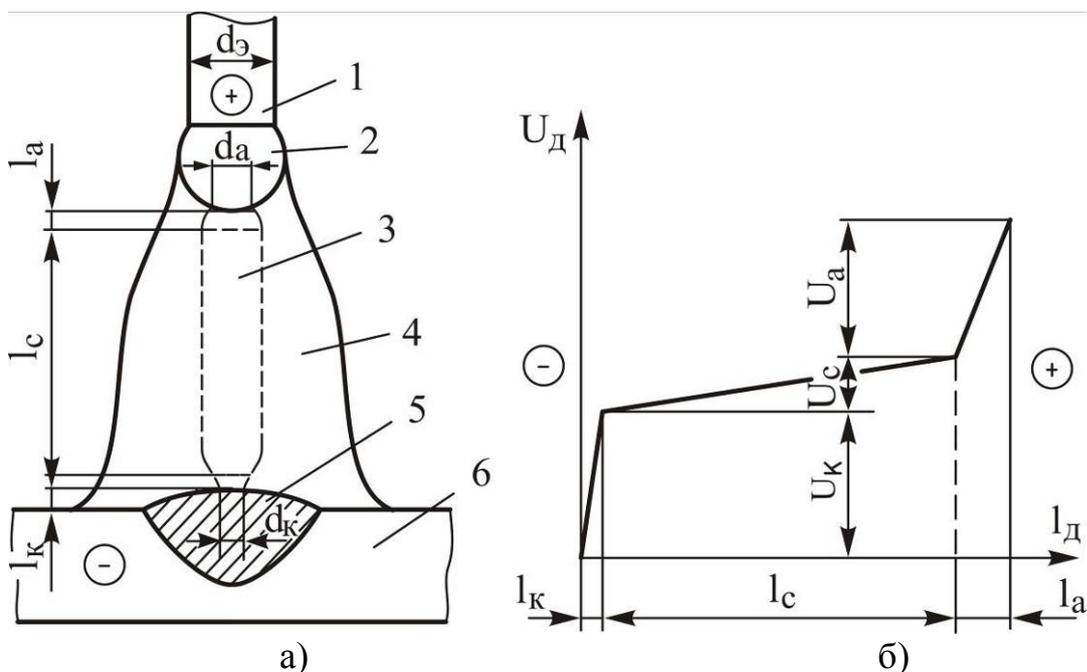


Рис. 1.1. Схема дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах (а) и схема распределения потенциала по длине дуги (б):

1 – плавящийся электрод; 2 – капля жидкого металла; 3 – столб дуги; 4 – ореол; 5 – жидкая ванна; 6 – свариваемое изделие;  $l_c$  – длина столба дуги;  $d_k$ ,  $d_a$  – диаметры соответственно катодного и анодного пятен;  $l_k$ ,  $l_a$  – длина катодной и анодной областей

Дугу, в отличие от других видов разрядов в газах, характеризует низкое общее напряжение дуги и высокая плотность тока. Электрическая дуга по длине имеет три области, отличающиеся физическими явлениями, протекающими в них (рис. 1.1). Области, непосредственно примыкающие к электродам, называют катодной (у отрицательного электрода) и анодной (у положительного электрода), 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 – анодное пятно, а на отрицательном – катодное. Размеры катодного пятна обычно меньше, чем анодного.

Поверхность металла в катодном и анодном пятне нагреваются до температуры кипения, и с поверхности их всегда происходит интенсивное испарение. Потоки паров оказывают большое влияние на характер плавления и перенос электродного металла, а также проплавление изделия.

Распределение потенциала по длине электрической дуги неравномерное. Около электродов происходят скачки падения потенциалов, вызванные условиями прохождения электрического тока на границе между ионизированным газом и металлическими электродами. Общее падение напряжения на дуге:

$$U_d = U_k + U_a + U_{ст} \quad (1.1)$$

где  $U_k$  и  $U_a$  – соответственно катодное и анодное падение напряжения, В;  $U_{ст}$  – падение напряжения в столбе дуги, В.

Протяженность катодной области равна примерно  $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$  см, а анодной  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$  см.

**Столб дуги.** Столб дуги или дуговая плазма – это совокупность электронов, ионов, возбужденных и невозбужденных нейтральных атомов и молекул. В столбе дуги непрерывно протекают процессы рождения (ионизации) и гибели (рекомбинации) заряженных частиц (электронов и ионов). Так как столб дуги содержит заряженные частицы, то он обладает электрической проводимостью. Поскольку масса электронов значительно меньше, чем масса ионов, то скорость первых выше скорости ионов, поэтому ток в дуге переносится в основном электронами. Параметры плазмы можно изменять в широких пределах путем изменения эффективного потенциала ионизации дугового газа, например активированием электродной проволоки или изделия. При этом снижение эффективного потенциала ионизации газа в столбе дуги приводит к уменьшению напряженности электрического поля и температуры столба, увеличению размеров дуги и, как следствие, понижению концентрации энергии дуги.

Характерная особенность любой дуговой плазмы заключается в термическом механизме возбуждения и ионизации, при котором ответственным за развитие ионизации являются электроны.

Поперечные размеры столба дуги, горящей в открытом объеме, определяются силой тока дуги, теплопроводностью газа, заполняющего дуговой промежуток, и давлением. Чем больше теплоотвод от столба дуги, давление и меньше сила тока дуги, тем меньше размеры столба. Теплопроводность атомарных газов с повышением (температуры увеличивается плавно. В связи с этим температура от оси столба к периферии уменьшается также плавно. В молекулярных газах наблюдается иная

картина. В центральной части столба основная часть молекул диссоциирована, а снаружи газ находился в молекулярном состоянии. Молекулы, попадая в зону высоких температур, диссоциируют, поглощая соответствующую энергию. В связи с этим поперечные размеры столба дуги в молекулярных газах ( $N_2$ ,  $CO_2$ ) меньше, чем в атомарных. Чем меньше диаметр дуги, тем выше плотность тока, следовательно, больше избыточное давление в столбе дуги, вызываемое собственным магнитным полем.

По данным ряда работ, температура дуги при сварке плавящимся электродом сравнительно невелика: 5000–6500 К [2, 3, 4]. При сварке неплавящимся электродом температура дуги значительно выше. Сварочную дугу при использовании плавящегося электрода для сварки в защитных газах характеризует сильное излучение. Состав излучения и его интенсивность зависят от рода защитного газа, свариваемого металла и электрода, мощности дуги, размеров ее столба и давления. Основным источником излучения является столб дуги. Спектр излучения различных дуг лежит в пределах длин волн  $\lambda=1700\text{--}50000$  А (рис. 1.2). Наиболее вредными для глаз и кожи человека являются ультрафиолетовые (1700–4000 А) и коротковолновые инфракрасные (7000–15000 А) лучи. Интенсивность ультрафиолетового излучения зависит в основном от рода защитного газа. Так, дуга в аргоне характеризуется более интенсивным ультрафиолетовым излучением, чем дуга в углекислом газе.

Мощность, потребляемая столбом дуги от источника питания, отводится в окружающее пространство посредством теплопроводности, излучения и конвекции. В сварочных дугах потери энергии от конвекции невелики, и их можно не учитывать. Доля энергии, теряемой от теплопроводности и излучения, зависит от температуры столба дуги. Можно полагать, что в высокоамперных дугах при плавящихся электродах потеря энергии происходит в основном посредством излучения.

**Катодная область.** Процессы, протекающие в этой области, имеют основное значение в поддержании дугового разряда и получении стабильной дуги. Под действием электрического поля из столба дуги на катод свободно поступают ионы, образующиеся в плазме дуги. Эти ионы создают у катода положительный объемный заряд, что приводит к появлению катодного падения потенциала. Чтобы покинуть металл, электроны должны преодолеть некий потенциальный барьер, для чего им необходимо сообщить энергию, превосходящую работу выхода электронов из материала катода. Такую энергию электроны могут получить различными путями. Эмиссия электронов с поверхности катода может происходить под действием электрического поля положительного объемного заряда (автоэлектронная эмиссия) при нагреве катода до

температуры, при которой возможна термоэлектронная эмиссия, при нейтрализации положительных ионов на катоде (ионно-электронная эмиссия), под действием фотоэлектронных и других явлений.

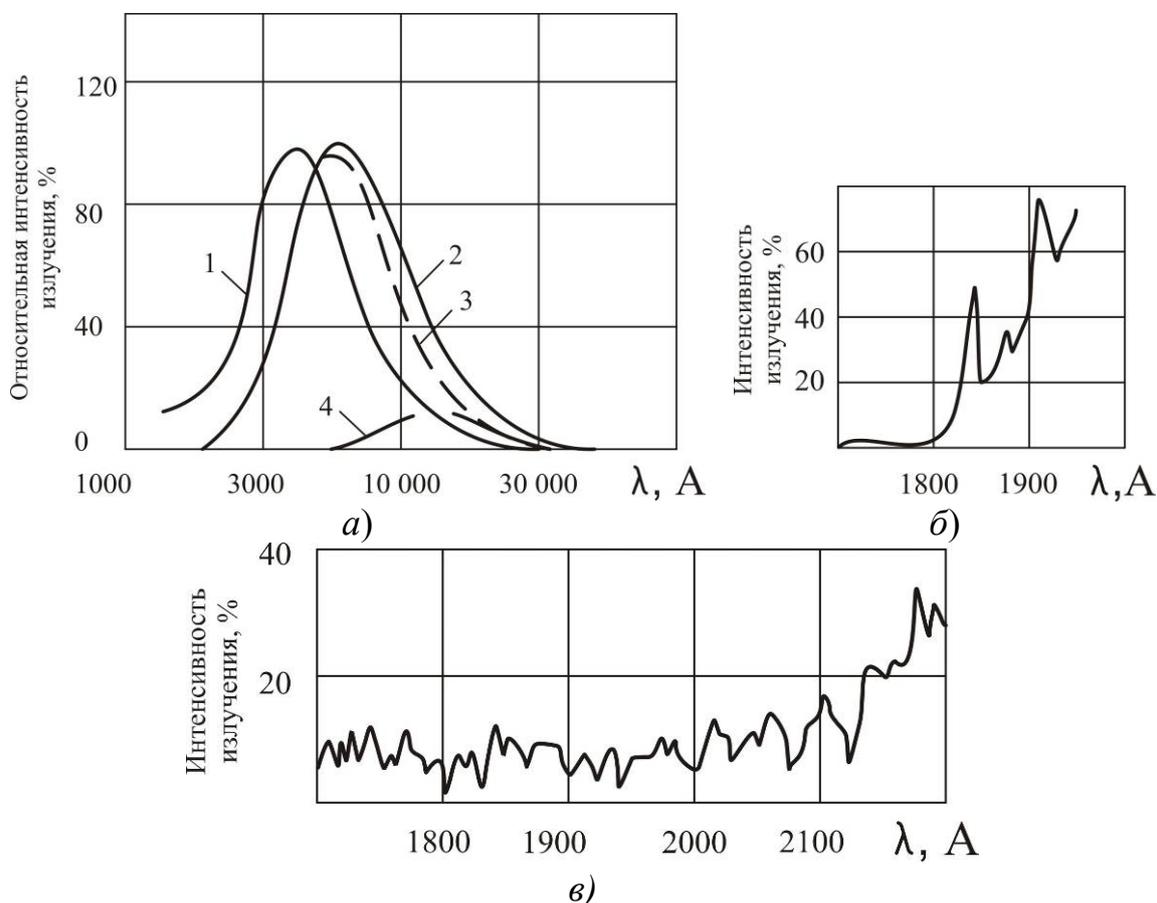


Рис. 1.2. Интенсивность излучения дуг при ручной дуговой сварке (а), автоматической сварке алюминия в аргоне (б) и стали в углекислом газе (в) покрытым электродом: 1 – излучение солнца; 2 – общее излучение при сварке; 3 – излучение столба дуги; 4 – излучение с электродов

При сварке плавящимся электродом поверхность катодного пятна нагрета до температуры кипения, что всегда приводит к интенсивному испарению. Появление паров металла катода, имеющих, как правило, более низкий потенциал по сравнению с потенциалом дугового газа, приводит к понижению катодного падения потенциала. Например, нанесение на катод при сварке в защитных газах щелочных, щелочноземельных и редкоземельных элементов или их соединений уменьшает катодное падение и разогрев катода. Аналогично ведет себя добавка 2–5%  $O_2$  к аргону. 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 катоду. Размеры его с увеличением силы тока возрастают. Определить размеры катодного пятна на плавящемся электроде сильнотоочной дуги весьма трудно, поэтому сведения о его размерах часто противоречивы. Однако катодное пятно меньше столба дуги. Плотность тока в катодном пятне лежит в пределах  $10^3$ – $10^7$  А/см<sup>2</sup>. С целью увеличения энергии, выделяющейся на катоде, следует стремиться увеличить катодное падение потенциала.

**Анодная область.** Ток в этой области переносится отрицательно заряженными частицами – электронами, а в случае наличия в дуговом промежутке газов, обладающих электроотрицательным потенциалом, также отрицательными ионами. В большинстве дуг у анода формируется отрицательный объемный заряд с положительным падением потенциала, ускоряющим движение отрицательно заряженных частиц по направлению к аноду. При этом устанавливается анодное падение потенциала  $U_a$ , обеспечивающее перенос заданного тока через переходную область между плазмой и анодом. Значение анодного падения потенциала в основном определяется параметрами плазмы, сечением анодного пятна и силой тока. При сварке плавящимся электродом анод, интенсивно испаряясь, поставляет в анодную область пары металла, обладающие низким потенциалом ионизации. Ионизация паров в анодной области приводит к увеличению концентрации ионов, в результате анодное падение потенциала уменьшается. Наличие в столбе дуги и анодной области электроотрицательных частиц приводит к повышению анодного падения потенциала и вызывает сужение дуги.

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

**Потоки плазмы.** В электрических дугах, особенно при больших токах, наблюдаются потоки плазмы, исходящие из электродов. При сварке плавящимся электродом в защитных газах эти потоки оказывают большое влияние на характер плавления и перенос электродного металла, а также проплавление изделия. Основными причинами возникновения плазменных потоков являются интенсивное поверхностное испарение электродов в активных пятнах и сжатие столба дуги у электродов. Струя пара всегда выбрасывается перпендикулярно к испаряемой поверхности. Попадая в дугу, нейтральные атомы и молекулы возбуждаются, ионизируются и приобретают вид плазменных потоков. При наличии сужения дуги у электродов в результате изменения сечения стол-

ба по длине дуги возникает градиент плотности тока, а следовательно, и перепад избыточного давления, который приводит к осевому течению плазмы, направленному от электродов.

При сварке в защитных газах плавящимся электродом наблюдаются потоки плазмы с обоих электродов. Результирующий поток определяется их взаимодействием и может быть направлен как на изделие, так и на электрод. При этом потоки плазмы могут совпадать и не совпадать со столбом дуги. При сварке в углекислом газе, азоте и водороде на обратной полярности обычно доминирующим на средних и повышенных значениях силы тока является поток с анода. Вследствие высокой концентрации теплоты в анодном пятне и слабой конусности дуги определяющим является испарение. Известно, что в этих случаях поток плазмы затрудняет перенос электродного металла в ванну. При сварке в аргоне, наоборот, из-за меньшей концентрации энергии в активных пятнах и большей конусности дуги при силе тока выше критической перемещение плазмы от электрода к изделию, по-видимому, определяется в основном собственным магнитным полем. При этом поток плазмы способствует переносу электродного металла и увеличению узкого глубокого проплавления в центре шва.

**Вольтамперная характеристика дуги.** Вольтамперную характеристику (ВАХ) между установившимися значениями напряжения и силы тока при постоянной длине дуги называют статической, а между неустановившимися – динамической. На рис. 1.3 приведены статические ВАХ ряда свободно горящих дуг при сварке в защитных газах плавящимся электродом. Как следует из этих данных, в диапазоне рабочих токов при сварке плавящимся электродом вольтамперные характеристики слегка возрастающие. При малых значениях силы тока вольтамперная характеристика может быть жесткой и падающей.

Возрастание ВАХ с увеличением силы тока можно объяснить тем, что в рабочем диапазоне токов замедляется рост концентрации заряженных частиц, а увеличению сечения столба препятствует собственное магнитное поле и магнитное поле тока, текущего по электроду. С увеличением длины дуги крутизна подъема вольтамперных характеристик также несколько увеличивается.

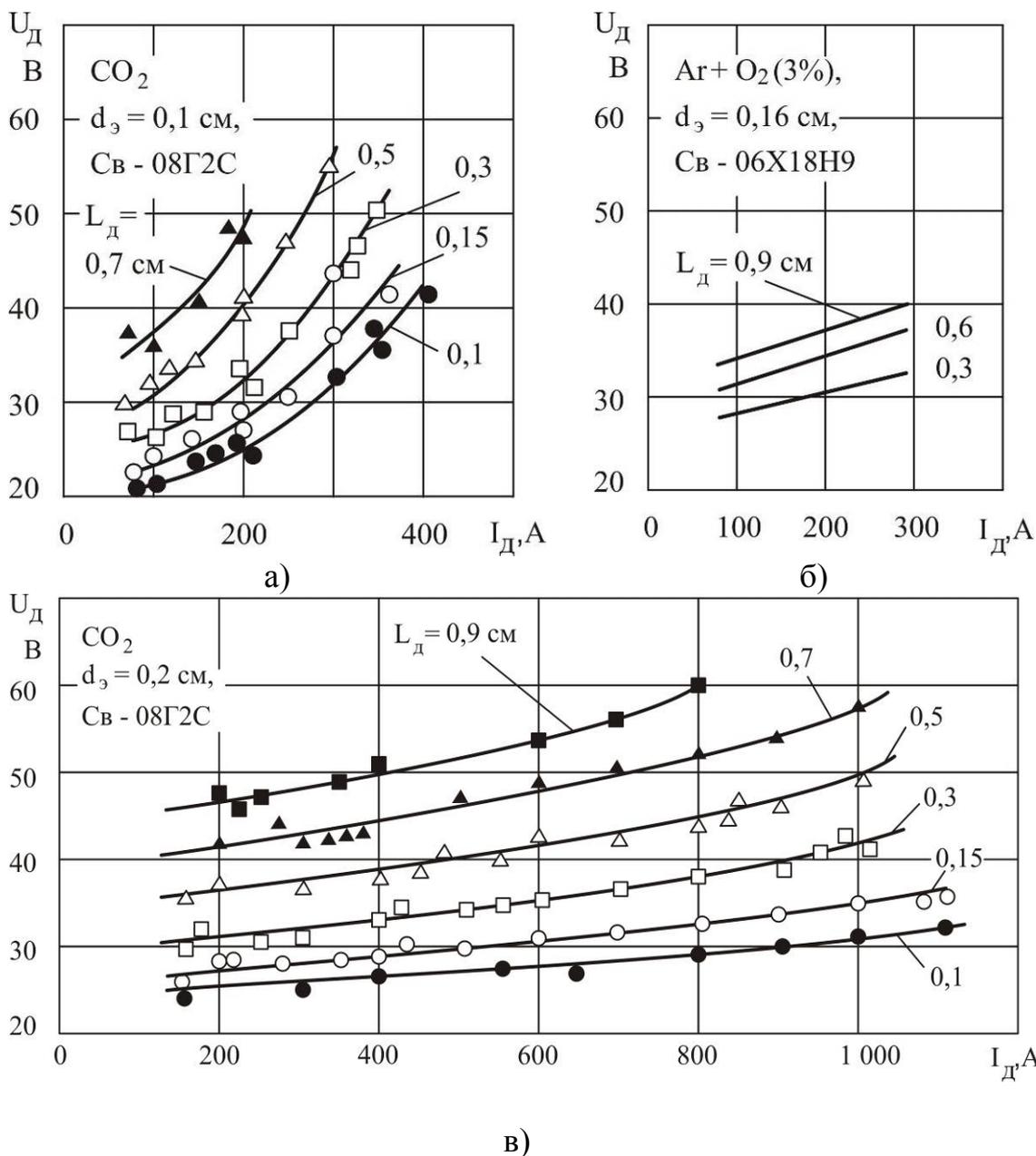


Рис. 1.3. Статические вольтамперные характеристики при сварке в углекислом газе (а, б) и аргоне (в). Обратная полярность, электродная проволока Св-08Г2С,  $\Delta I_d / \Delta I_d / \Delta t = 1700 \dots 2700$  кА/с

Форму **статической ВАХ** определяют род защитного газа, диаметр и материал плавящегося электрода. Это обусловлено изменением параметров плазмы дуги, что находит свое выражение в различной напряженности электрического поля  $E$ , изменении приэлектродных падений потенциала  $U_k + U_a$  и падении напряжения в вылете электрода. С увеличением  $I_d$  и диаметра электрода сумма  $U_k + U_a$  и значение  $E$  повышаются. Эти параметры также увеличиваются при замене аргона гелием

и углекислым газом. Особенно большие их значения обнаружены при сварке в водяном паре и под водой, что может быть объяснено присутствием в зоне дуги водорода.

**Динамические ВАХ** (рис. 1.4), описывающие свойства импульсной дуги, устанавливают соотношение между напряжением и силой тока, изменяющейся во времени, и содержат три переменных:  $U_d$ ,  $I_d$ ,  $t$ . Начало характеристики лежит в точке А, координаты которой определяются начальными значениями напряжения и силы тока дуги. При скоростях нарастания силы тока выше скоростей ионизации или при спаде силы тока со скоростью больше скорости деионизации динамическая ВАХ имеет петлеобразную форму (появляется так называемый гистерезис тока). Таким образом, гистерезис характеризует инерционность тока дуги, обусловленную инерционностью процессов ионизации–деионизации. Отсутствие гистерезиса динамических характеристик при малых скоростях изменения силы тока свидетельствует об отсутствии инерционности тока дуги.

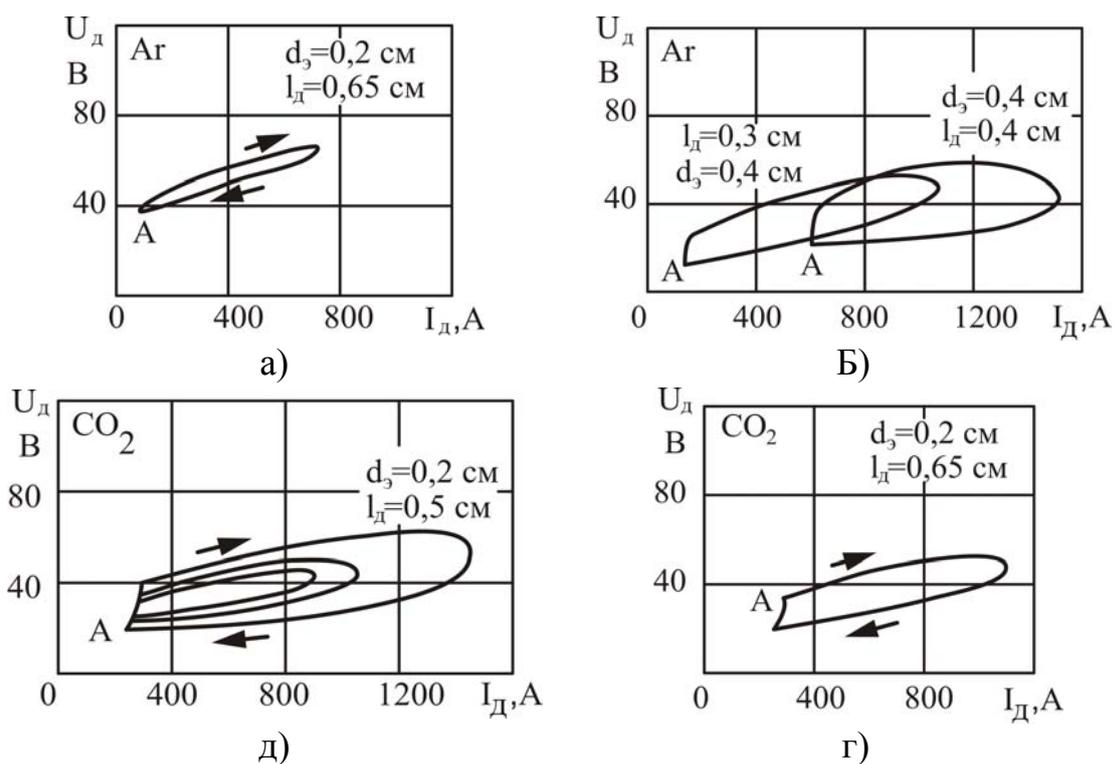


Рис. 1.4. Динамические вольтамперные характеристики при сварке в аргоне (а, б) и углекислом газе (в, г). Обратная полярность, электродная проволока Св-08Г2С,  $\Delta I_d / \Delta t = 1700 \dots 2700 \text{ kA/c}$

В этом случае можно считать, что динамическая ВАХ совпадает со статической при условии сохранения неизменной длины дуги за время изменения силы тока. Увеличение амплитуды импульса тока и скорости его изменения приводит к увеличению гистерезиса. Изменение рода защитного газа не изменяет положения ветвей динамической вольтамперной характеристики при нарастании и спаде силы тока. Однако форма петли зависит от рода защитного газа. Это может быть объяснено тем, что скорости ионизации и деионизации в различных газах различны.

В реальных условиях при сварке в защитных газах плавящимся электродом с постоянной скоростью подачи проволоки ток, и напряжение изменяются, а в ряде случаев процесс ведут с перерывами в горении дуги. Стабильное течение процесса сварки в этих случаях достигается за счет саморегулирования, обнаруженного В.И. Дятловым в 1941 г. Поэтому за основные электрические характеристики, единые для всех процессов, могут быть приняты напряжение  $U_d$  и сила тока  $I_d$  сварки, которые для общего случая имеют вид

$$U_{св} = \int_0^{T_u} u(t) dt, \quad (1.2)$$

$$I_{св} = \int_0^{T_u} i(t) dt. \quad (1.3)$$

где  $u(t)$  и  $i(t)$  – мгновенные значения соответственно напряжения и силы тока;  $T_u$  – длительность цикла.

Величина  $U_{св}$  включает в себя падение напряжения на дуге, вылете электрода и переходном контакте между токоподводом и электродной проволокой. В некоторых случаях при сварке стационарной дугой проволокой больших диаметров с малым удельным электрическим сопротивлением напряжение сварки  $U_{св}$  близко к напряжению дуги  $U_d$ . В большинстве же случаев  $U_{св}$  является сложной функцией и определяется как среднее или действующее значение по осциллограммам изменения напряжения в процессе сварки. В общем виде процесс сварки в защитных газах плавящимся электродом стационарной и нестационарной дугой может быть описан вольтамперными характеристиками устойчивого течения процесса сварки  $U_{св} = f(I_{св})$ , которые выражают зависимость между напряжением сварки  $U_{св}$  и силой сварочного тока  $I_{св}$  при сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Эти характеристики зависят от рода защитного газа, диаметра и состава электродной проволоки, программы изменения энергии процесса, силы тока, поляр-

ности, вылета и нагрева электрода, а также от внешних характеристик источника питания [3, 5-7].

По ВАХ устойчивого течения процесса сварки в аргоне и углекислом газе (рис. 1.5) видно, что с увеличением скорости подачи электродной проволоки кривые  $U_{св} = f(I_{св})$  смещаются в сторону больших токов, изменяя наклон. При сварке на малых токах (при малых скоростях подачи проволоки), в пределах которых процесс протекает с короткими замыканиями, повышение напряжения приводит к уменьшению силы сварочного тока.

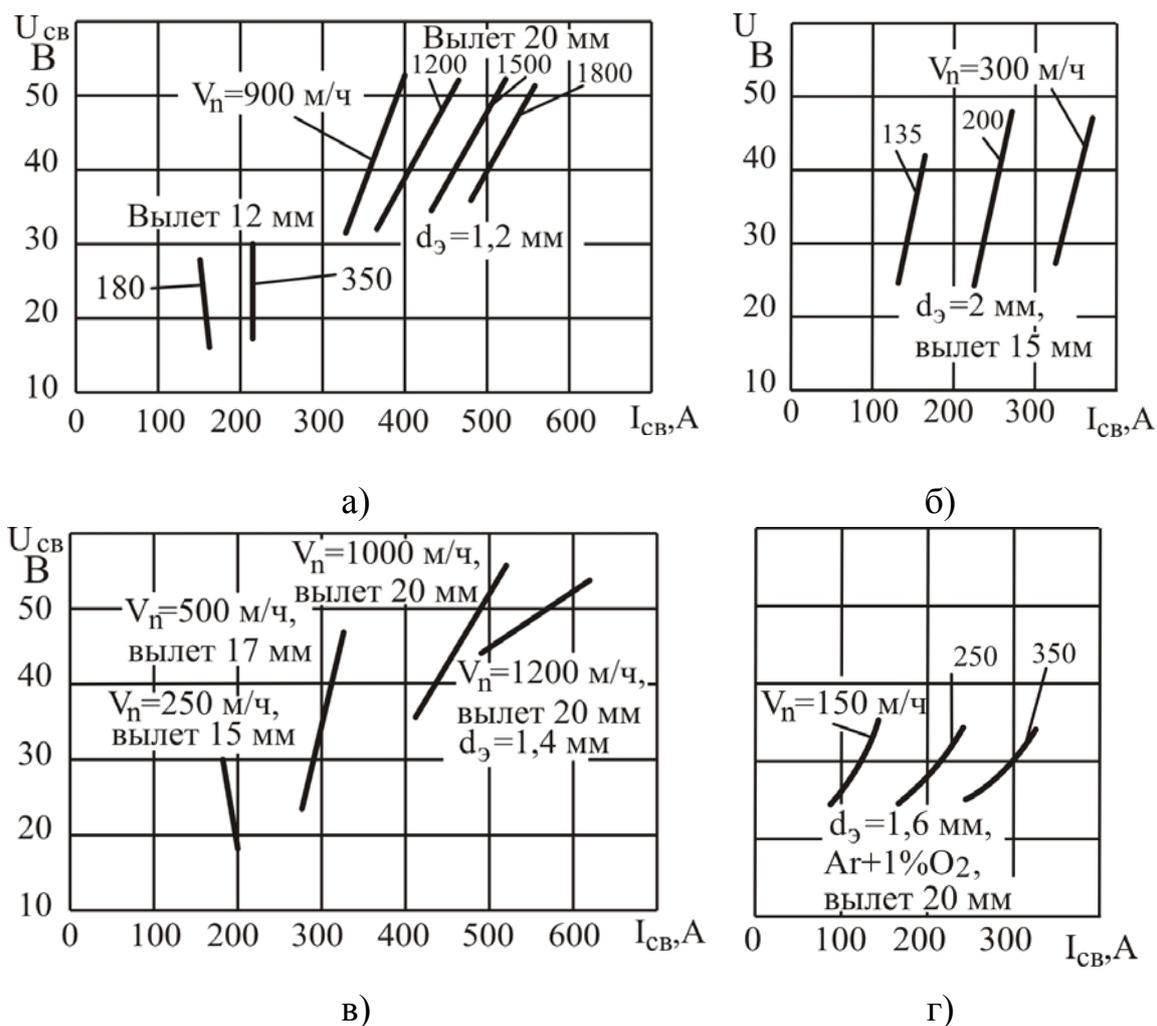


Рис. 1.5. Вольтамперные характеристики устойчивого течения процесса сварки в  $CO_2$  (а, б, в) и в аргоне + 1%  $O_2$  (г). Проволока Св-08Г2С, обратная полярность

При сварке на больших токах (больших скоростях подачи проволоки), когда процесс протекает с редкими короткими замыканиями или без них, с увеличением напряжения сила тока возрастает. При этом, чем

больше скорость подачи проволоки, тем больше увеличивается сила тока с повышением напряжения. По-видимому, основной причиной этого является увеличение потерь на излучение с увеличением силы тока дуги, а также изменение вылета электрода. При питании от источника с жесткой ВАХ увеличение вылета приводит к уменьшению  $U_d$ . При питании от источника с падающей ВАХ изменение  $U_d$  и длины дуги минимальное.

Изменение рода защитного газа и диаметра электрода не меняет отмеченной закономерности. С уменьшением диаметра электрода изменение наклона кривых  $U_{св} = f(I_{св})$  проявляется более резко. Изменение состава электродной проволоки отражается на наклоне вольтамперных характеристик процесса в том случае, если изменяется удельное электрическое сопротивление электрода: с его увеличением наклон ВАХ увеличивается. Уменьшение вылета электрода приводит к увеличению силы сварочного тока и тем большому, чем больше изменение падения напряжения на вылете.

Внешние характеристики устойчивого течения процесса сварки используются для настройки режима сварки, оценки влияния ВАХ источников питания на стабильность процесса сварки и др. [3, 7, 8]. Было установлено [7], что наклон вольтамперных характеристик источников постоянного тока влияет на интенсивность кратковременных изменений длины дуги при хаотических перемещениях катодного и анодного пятен по поверхности капли и ванны. Длина дуги при кратковременных смещениях анодного пятна по капле при сварке на обратной полярности и питании от источника с падающей ВАХ (наклон  $k = -0,1 \dots 0,15$  В/А) примерно в 1,5–1,8 раза больше чем при питании от источника с жесткой (пологопадающей) ВАХ ( $k = -0,015$  В/А). В результате таких хаотических (кратковременных) удлинений дуги размеры столба дуги больше, чем при жесткой ВАХ. Дуга более эластична и растягивается на большую длину (рис. 1.6).

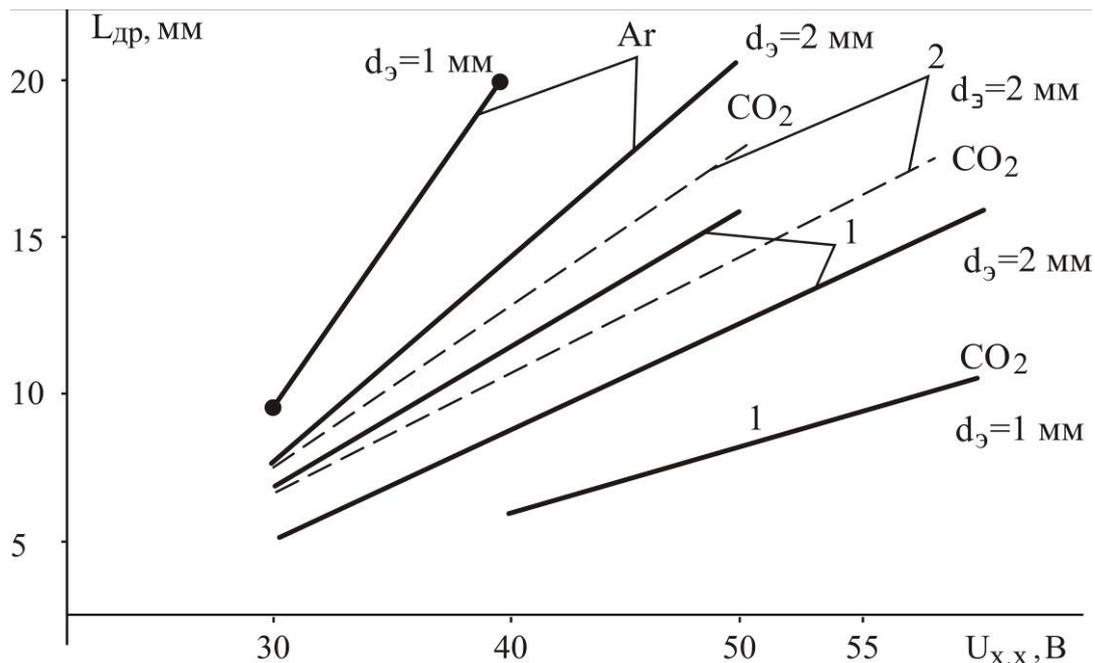


Рис. 1.6. Зависимость длины дуги до обрыва  $l_{д.р.}$  от напряжении холостого хода источника  $U_{х.х.}$  рода защитного газа, диаметра электрода и наклона ВАХ источника: 1 – источник с жесткой ВАХ ( $k = -0,1$  В/А); 2 – источник с падающей ВАХ. Электродная проволока Св-08Г2С, обратная полярность

### 1.3. Виды процессов сварки

Для получения при дуговой сварке высококачественных соединений необходима защита зоны дуги и расплавленного металла от вредного воздействия воздуха, а в ряде случаев также легирование и металлургическая обработка металла шва. При сварке в защитных газах для защиты зоны сварки используют газ, подаваемый струей в зону сварки (рис. 1.7). Род защитного газа определяет физические, металлургические и технологические характеристики способа сварки. Источником нагрева служит электрическая дуга. При сварке неплавящимся электродом (угольным, графитовым или вольфрамовым) дуга горит между неплавящимся электродом и свариваемым изделием, расплавляет кромки изделия. При этом образуется некоторый объем расплавленного металла (сварочная ванна), которая затвердевает, образуя сварной шов, и соединяет части изделия (рис. 1.7, а). При сварке плавящимся электродом дуга горит между электродной проволокой, непрерывно подаваемой в зону сварки, и изделием. Дуга расплавляет кромки деталей и электродную проволоку, переходящую в виде капель в общую сварочную ванну. По мере перемещения дуги сварочная ванна затвердевает, образуя шов, соединяющий кромки изделия (рис. 1.7, б).

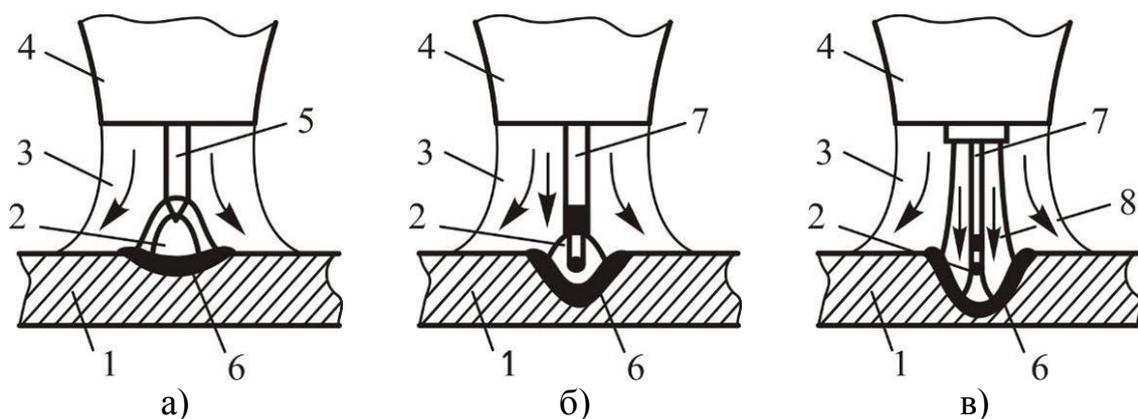


Рис. 1.7. Схемы процессов сварки в защитных газах неплавящимся (а), плавящимся (б) электродом и в двух потоках газа (в): 1 – деталь, 2 – дуга; 3 – защитный газ; 4 – сопло; 5 – неплавящийся электрод, 6 – сварочная ванна; 7 – плавящаяся электродная проволока, 8 – внутренний поток газа

Для экономии защитного газа, а также для получения в отдельных случаях дополнительного положительного эффекта при формировании металла шва из расплава, сварку ведут в двух отдельных потоках газов, подаваемых концентрично вокруг основной дуги (рис.1.7, в). При этом во внутреннем потоке газа горит дуга и находится капля электродного металла, а жидкая металлическая ванна защищается смесью внутреннего и наружного потоков. Существует способ сварки в двух концентрических струях активного защитного газа ( $\text{CO}_2$ , или смеси с  $\text{CO}_2$ ) истекающего из одной общей камеры сварочного сопла [9-11], также применяют способы сварки в среде чередующихся и пульсирующих инертных газов ( $\text{Ar}$  и  $\text{He}$ ) [12-18].

При необходимости металлургической обработки и дополнительном легировании шва в зону дуги подают небольшое количество раскисляющих или легирующих веществ (рис. 1.8). Указанные вещества проще всего ввести при помощи порошковой проволоки. Изредка шлакообразующие вещества вводят в виде пыли или паров вместе с защитным газом, в виде магнитного флюса или флюса, засыпаемого в разделку кромок, в виде обмазки, наносимой на поверхность электродной проволоки, и другими способами. Состав металла шва можно изменить, подавая в зону сварки дополнительную присадочную проволоку, а также выполняя двухдуговую сварку в общую ванну с использованием проволоки различного состава. Разработан ряд управляемых способов сварки, таких как импульсно-дуговая, вибродуговая и другие (рис. 1.8).

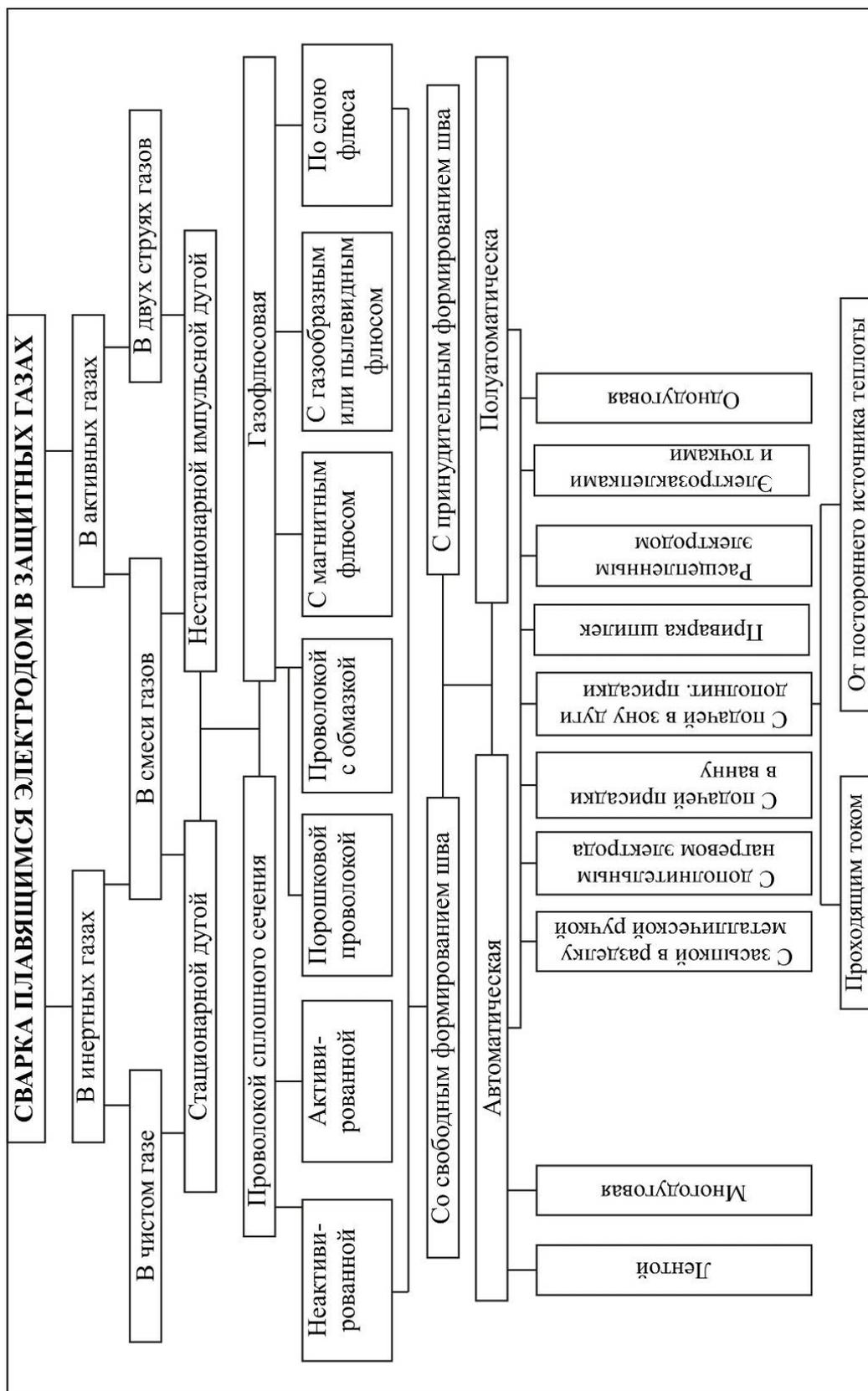


Рис. 1.8. Классификация способов сварки в защитных газах

В ряде случаев успешно применяют двухдуговую или гибридную сварку. В первом случае осуществляют процесс сварки от двух одновременно горящих дуг между неплавящимся электродом и изделием и плавящимся электродом и изделием. Во втором, обычно используют сочетание высоконцентрированного источника нагрева (плазменная дуга, лазерный луч и другие) и плавящегося электрода. Обычно для сварки используют проволоку сплошного сечения или трубчатую, заполненную внутри легирующими веществами, называемую «порошковой». Иногда, для повышения производительности или изменения формы шва сварку ведут несколькими проволоками, подключенными к одному полюсу источника тока (рис. 1.8). Состав металла шва можно изменять, меняя состав электродной проволоки, изменяя долю электродного металла в шве, подачей в зону сварки дополнительной присадочной проволоки. Основные разновидности сварки в защитных газах плавящимся электродом приведены на рис. 1.8.

Сварка в защитных газах проволоками, имеющими температуру плавления ниже, температуры плавления свариваемого металла применяется для сварки чугуна, наплавки цветных металлов на сталь, пайки тонкой оцинкованной стали.

Процесс сварки можно разделить на три основные стадии: установления стабильного течения (начало сварки); стабильное течение; прекращение процесса сварки (рис. 1.9). Первую стадию характеризует отрезок времени, на протяжении которого устанавливается заданный режим сварки. Стабильное течение процесса – это отрезок времени, на протяжении которого заданный режим сварки сохраняется неизменным и происходит образование шва. Прекращение процесса сварки – отрезок времени, на протяжении которого происходит переход от стабильного течения процесса до обрыва дуги и окончания сварки [19].

**Установление стабильного процесса сварки.** Эта стадия определяет провар в начале шва и разбрызгивание. В большинстве случаев желательна минимальная продолжительность начала сварки и быстрый разогрев свариваемого изделия, без ускоренного охлаждения электрода.

Существуют контактные и бесконтактные способы начала сварки [2, 6, 20]. При сварке плавящимся электродом применяют контактные способы, при которых дуга зажигается при закорачивании электрода с изделием. При сварке неплавящимся электродом применяют в основном бесконтактные способы, когда дуга зажигается в результате пробоя высоковольтным разрядом промежутка между электродом и изделием (рис. 1.10).

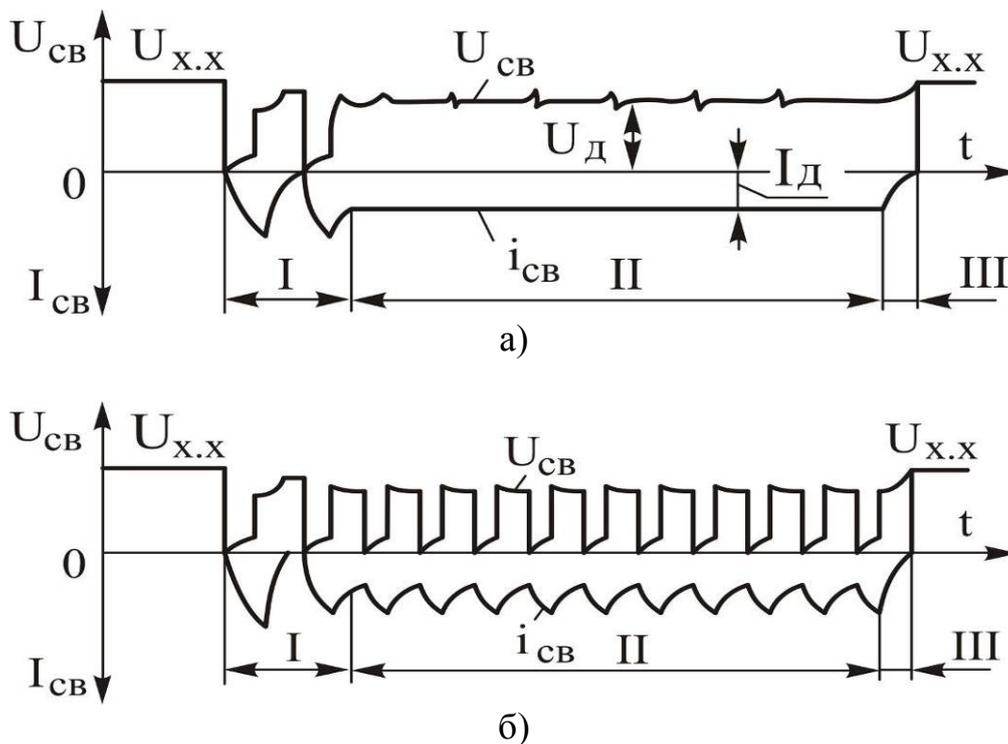


Рис. 1.9. Схемы изменения напряжения и силы тока на протяжении процесса сварки: а) без коротких замыканий; б) с короткими замыканиями. I – начало процесса; II – стабильное течение процесса; III – прекращение процесса сварки;  $U_{CB}$ ,  $U_{x.x}$  – напряжение сварки;  $U_{д}$  – напряжение дуги;  $U_{x.x}$  – напряжение холостого хода;  $I_{CB}$ ,  $i_{CB}$  – сила тока сварки;  $I_{д}$  – сила тока дуги;  $t$  – время

При сварке в защитных газах для получения качественного начала шва без пор и разбрызгивания в зону сварки предварительно подают защитный газ. При сварке проволоками сплошного сечения диаметром до 2,0 мм и порошковыми проволоками до 3,2 мм сварку начинают, предварительно закоротив электрод на изделие или без предварительного закорачивания. С предварительным закорачиванием электрода на изделие (рис. 1.10, а) через 1–2 секунды после подачи защитного газа подают напряжение на электрод и включают электроддвигатель подачи проволоки к изделию. Электрод нагревается и при высоких скоростях нарастания силы тока короткого замыкания (100–300 кА/с) перегорает у изделия. Зажигается дуга, которая оплавляет электрод и изделие. Если напряжение и запас энергии, накопившейся в дросселе, включаемом в сварочную цепь для формирования динамических свойств системы питания, достаточны для горения дуги, то дуга не гаснет и начинается стабильное течение сварки. При начале сварки без предварительного закорачивания электрода на изделие через 1–2 с после подачи защитного газа включают источник тока, и электроддвигатель подачи проволоки к изделию. Электрод нагревается и при высоких скоростях нарастания силы

тока короткого замыкания (100–300 кА/с) перегорает у изделия. Зажигается дуга, которая оплавляет электрод и изделие. Если напряжение и запас энергии, накопившейся в дросселе, включаемом в сварочную цепь для формирования динамических свойств системы питания, достаточны для горения дуги, то дуга не гаснет и начинается стабильное течение сварки.

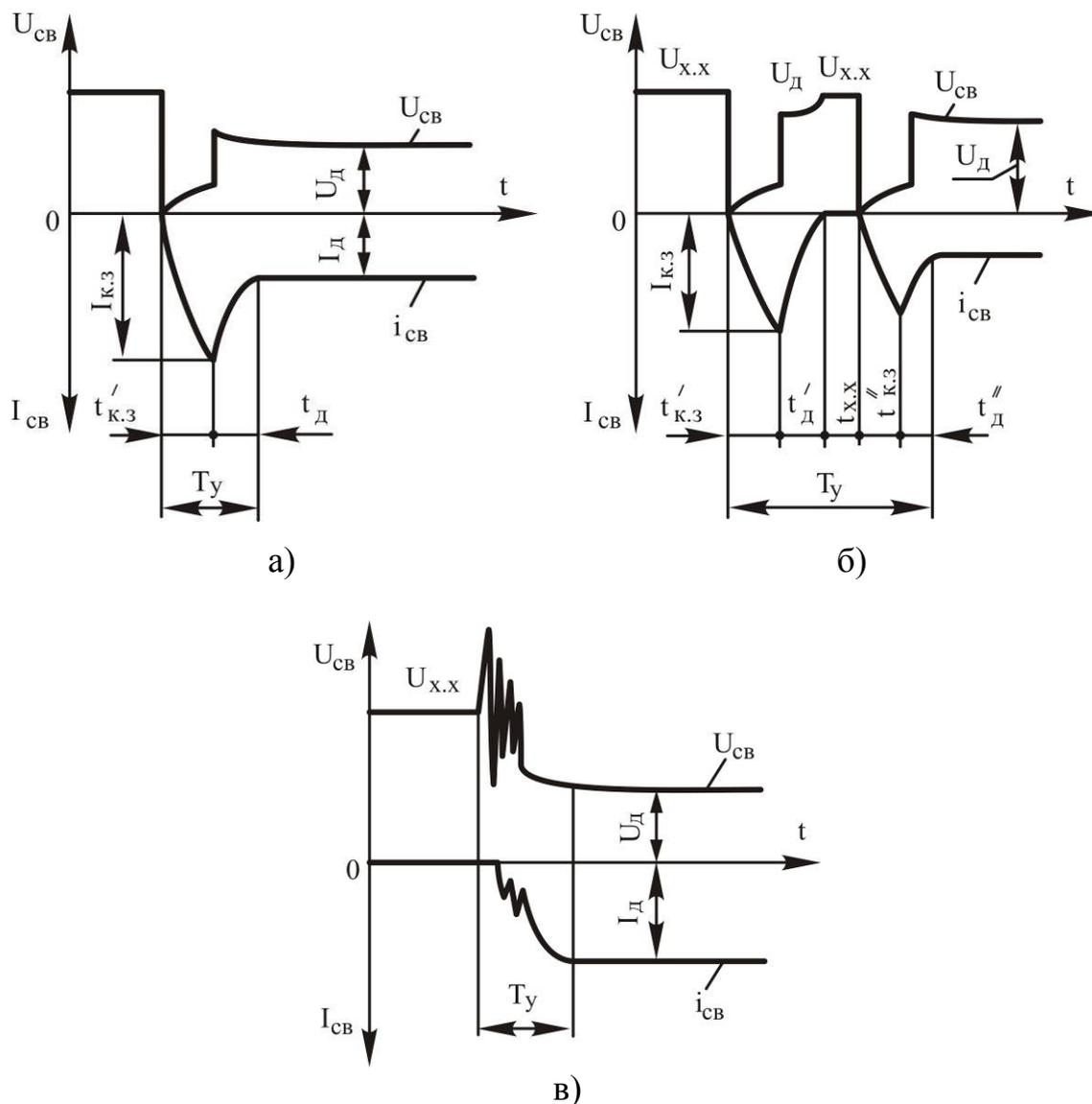


Рис. 1.10. Схемы изменения напряжения и силы тока при установлении процесса сварки путем подачи проволоки к детали (а), замыкания и отрыва электрода от детали (б) и без короткого замыкания (в).  
 $T_y$  – длительность установления процесса

При начале сварки без предварительного закорачивания электрода на изделие через 1–2 с после подачи защитного газа включают источник тока, и электродвигатель подачи проволоки к изделию. Через некоторое время проволока касается изделия и с усилием прижимается к нему. Под действием силы тока короткого замыкания проволока нагревается, изгибается и перегорает у токоподвода. Зажигается дуга, перегоревший у токоподвода вылет отбрасывается взрывом. Дуга, загоревшаяся между электродом и перегоревшим вылетом, растягивается и обрывается. Через некоторое время, зависящее от скорости подачи, проволока приближается к изделию, и наступает второе короткое замыкание. При высоких скоростях нарастания силы тока короткого замыкания (100–300 кА/с) подогретый конец электрода перегревается и перегорает у изделия. Если напряжение источника тока достаточно для поддержания горения дуги, то дуга не гаснет, и с этого момента начинается стабильное течение процесса сварки. Продолжительность установления процесса сварки и разбрызгивание при этом приеме больше, чем при сварке с предварительным закорачиванием электрода на изделие.

Длительность начала сварки существенно зависит от скорости нарастания силы тока короткого замыкания в сварочной цепи и формы конца электрода (табл. 1.6). Наличие на электроде крупной капли приводит к его перегоранию у токоподвода горелки. Существенное влияние на длительность установления стабильного процесса сварки проволокой диаметром 0,8–1,4 мм оказывает вылет электрода: с увеличением вылета увеличивается время начала и разбрызгивание.

С увеличением диаметра электрода более 1,2 мм влияние вылета уменьшается. При сварке на малых значениях силы тока время начального возбуждения дуги больше, чем на средних. На больших значениях силы тока длительность начала увеличивается. Повышение напряжения сварки уменьшает длительность начала стабильного процесса. Однако, если длина дуги до обрыва больше расстояния между изделием и токоподводом, то после зажигания дуга может растянуться, перейти на токоподвод горелки и оплавить его. Поэтому при сварке тонкими проволоками с малыми вылетами необходимо ограничивать напряжение холостого хода источника тока (рис. 1.6).

Известно, что заострение электрода и нагрев его конца способствует перегоранию электрода у изделия. Увеличить нагрев конца электрода можно за счет зажигания дуги на вспомогательной пластине. Уменьшение времени между сваркой отдельных швов до 3–10 с улучшает начало сварки.

Таблица 1.6

*Зависимость времени начала процесса сварки в CO<sub>2</sub> проволокой Св-08Г2С с предварительным закорачиванием электрода на изделие от скорости нарастания силы тока короткого замыкания и состояния конца электрода*

Скорость нарастания $I_{к.з.}$ , кА/с	Состояние конца электрода	Время начала процесса, с, при диаметре электрода, мм					
		0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0
200 – 300	Крупная капля	0,13	0,15	0,17	0,20	0,25	0,30
	Малая капля	0,09	0,10	0,13	0,15	0,18	0,25
	Электрод заострен	0,04	0,06	0,08	0,09	0,12	0,14
100 – 150	Крупная капля	0,14	0,16	0,25	0,30	0,35	0,40
	Малая капля	0,10	0,12	0,18	0,20	0,28	0,30
	Электрод заострен	0,05	0,08	0,09	0,12	0,15	0,18
70 – 80	Крупная капля	0,20	0,25	0,30	0,38	0,45	0,55
	Малая капля	0,15	0,18	0,25	0,30	0,20	0,30
	Электрод заострен	0,10	0,12	0,18	0,20	0,16	0,20
45 – 50	Крупная капля	Непостоянно			0,50	0,58	0,65
	Малая капля	0,20	0,25	0,35	0,45	0,28	0,35
	Электрод заострен	0,18	0,20	0,30	0,25	0,25	0,28
20 – 30	Крупная капля	Непостоянно				0,65	0,70
	Малая капля					0,40	0,70
	Электрод заострен					0,30	0,35

*Примечание. Полярность обратная. Для проволоки диаметром 0,8–1,2 мм вылет составляет 10 мм. Сила тока сварки проволокой диаметром 0,8 мм – 120 А; 1,0 мм – 160 А; 1,2–1,4 мм – 220 А; 1,6 мм – 280 А; 2,0 мм – 320 А. Большая капля  $d_k > 1,5d_s$ ; малая капля  $d_k - (1,1...1,3) d_s$ . Конец электрода заостряли откусыванием кусачками под углом 45° к оси проволоки.*

Рекомендуемый вылет электродной проволоки типа Св-08Г2С для начала сварки в CO<sub>2</sub> на обратной полярности:

Диаметр электрода, мм.....	Вылет электрода, мм
0,8.....	8–10
1,0.....	10–12
1,2.....	11–13
1,4.....	12–15
1,6.....	15–18
2,0.....	18–25

Наложение импульсов тока малой длительности, имеющих высокие скорости нарастания силы тока в импульсе (200–300 кА/с) с частотой 25–100 Гц, приводит к перегоранию электрода в месте его контакта с изделием, ускоряет начало сварки и увеличивает провар в начале шва. Вибрация электрода также ускоряет начало сварки. Программированием силы тока и напряжения также можно улучшить начало сварки.

При сварке в аргоне и смесях аргона с углекислым газом длительность установления стабильного процесса сварки несколько меньше, чем в углекислом газе. Это обусловлено большей длиной дуги до обрыва, обеспечивающей больший нагрев электрода в нижней части и меньшее число коротких замыканий до перехода, и стабильное протекание сварки. При сварке порошковой проволокой продолжительность начала сварки также меньше, чем при сварке проволокой сплошного сечения.

При сварке электродной проволокой диаметром 3–5 мм электрод закорачивают на изделие. После подачи защитного газа включают подачу напряжения на электрод и электродвигатель подачи проволоки от изделия. При отрыве электрода перегретый участок перегорает, и загорается дуга. После зажигания дуги переключают электроддвигатель механизма на подачу проволоки к изделию. Другим вариантом начала сварки проволокой диаметром 3–5 мм является использование быстрорасплавляющейся токопроводящей вставки (стружки), закладываемой между электродом и изделием. Сварка начинается с одновременного включения напряжения и электроддвигателя механизма подачи проволоки к изделию. При сгорании стружки зажигается дуга, и начинается стабильный процесс сварки.

Можно утверждать, что неполный провар соединений, наплывы и разбрызгивание в начале шва при сварке в CO<sub>2</sub> проволокой Св-08Г2С диаметром до 2,5 мм вызваны большей длительностью начала сварки. Это часто вызвано увеличением активного и индуктивного сопротивления сварочной цепи при использовании сварочных кабелей заниженного сечения, при некачественном соединении кабелей между собой и с изделием, а также при укладке лишней длины кабеля в кольца.

Для обеспечения качественного начала сварки в CO<sub>2</sub> и его смесях проволокой диаметром до 2,5 мм рекомендуется начинать сварку при повышенных скоростях нарастания силы тока короткого замыкания, заостренным электродом или с малой каплей на конце, на пониженных вылетах электрода (при надежном контакте проволоки с токоподводом сварочной горелки). Программирование силы тока и напряжения в начале сварки, наложение импульсов тока и питание от источников с комбинированной падающей внешней характеристикой также улучшает на-

чало сварки [6, 20, 21]. Основным приемом ускорения начала сварки является выполнение процесса при повышенных скоростях нарастания силы тока в сварочной цепи.

#### **1.4. Перенос электродного металла и управление переносом**

**Стабильное течение процесса сварки.** Процесс должен обеспечить получение сварного соединения с неизменными заданными свойствами и размерами. Процесс можно считать стабильным, если его электрические и тепловые характеристики не изменяются во времени или же изменяются по определенной программе. Стабильный процесс сварки может быть получен при непрерывном и прерывистом горении дуги, а также при прерывистом протекании в сварочной цепи. Сварку можно вести как стационарной, так нестационарной (импульсной) дугой.

Основным условием стабильности процесса сварки стационарной дугой является постоянство силы тока, напряжения и длины дуги. В некоторых случаях при сварке стационарной дугой наблюдаются кратковременные изменения длины дуги, напряжения и силы тока, вызванные переносом крупных капель, однако при стабильном процессе характеристики плавления электрода и изделия определяются не ими, а параметрами стационарной дуги.

По характеру протекания можно выделить следующие виды сварки стационарной дугой проволокой сплошного сечения Св-08Г2С (рис. 1.11):

- с естественными короткими замыканиями дуги;
- с непрерывным горением дуги и крупнокапельным переносом металла;
- с непрерывным горением дуги и мелкокапельным переносом металла;
- с непрерывным горением дуги и струйным переносом металла;
- с непрерывным горением дуги и струйно-вращательным переносом металла.

Характерным признаком процесса с естественными короткими замыканиями является образование на электроде крупных капель, превышающих диаметр электрода в 1,5 раза и более, и закорачиванием ими дуги. При струйном процессе жидкий металл на конце электрода формируется в виде конуса, с конца которого отрываются капли диаметром менее 2/3 диаметра электрода. В процессе с мелкокапельным переносом и непрерывным горением дуги жидкого конуса на конце электрода нет, а диаметр отрывающихся капель равен 0,8–1,5 диаметра электрода.

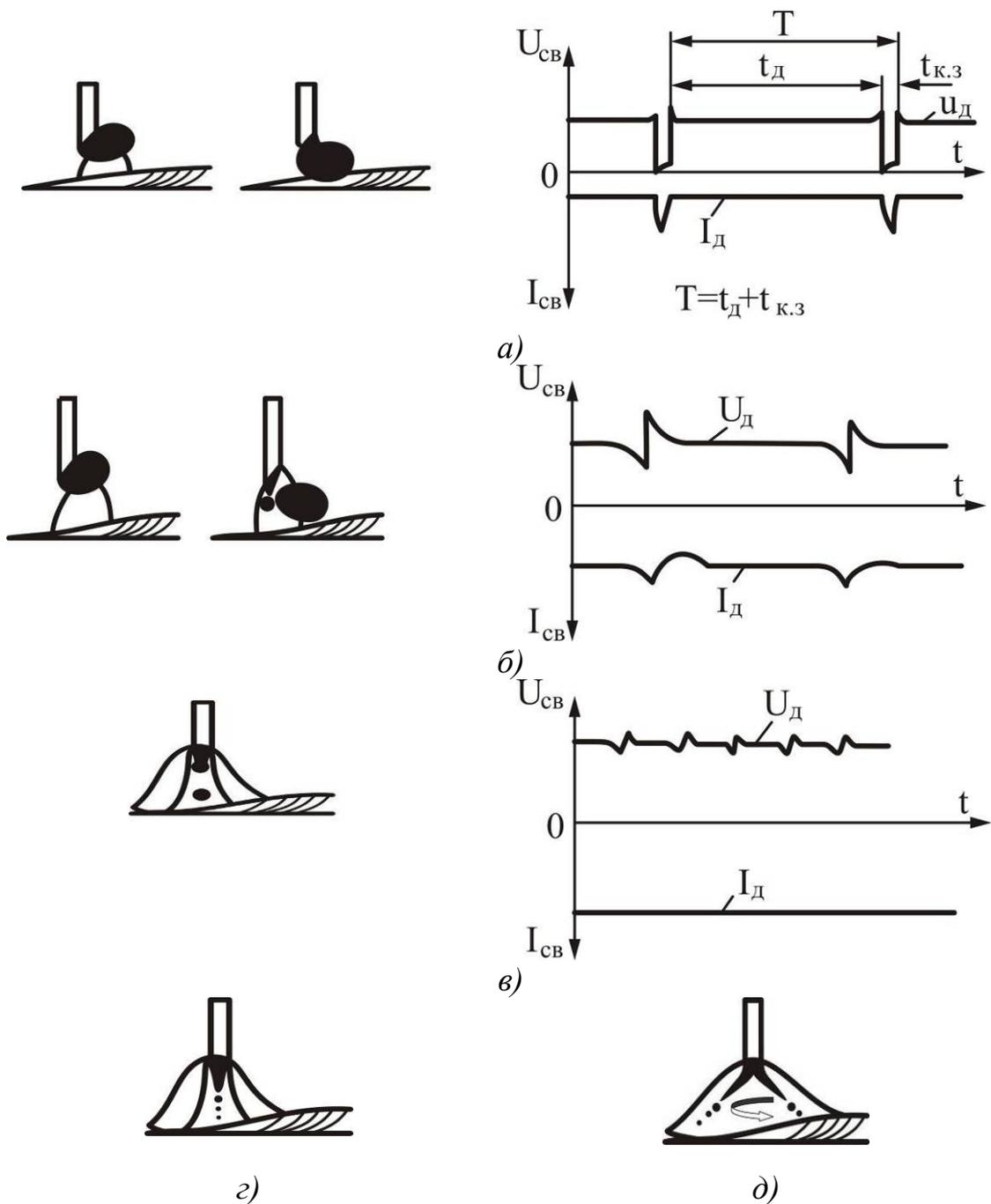
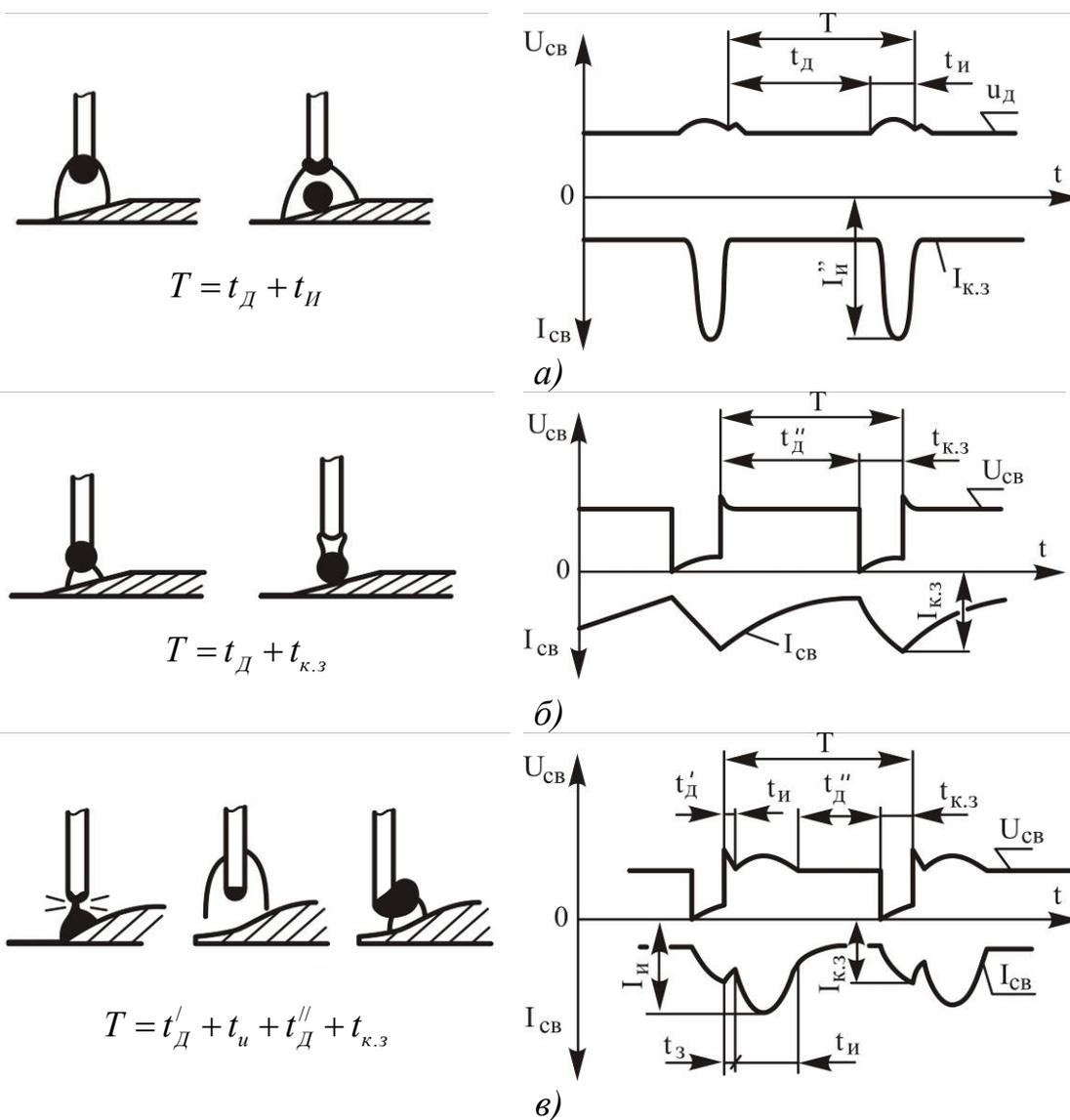
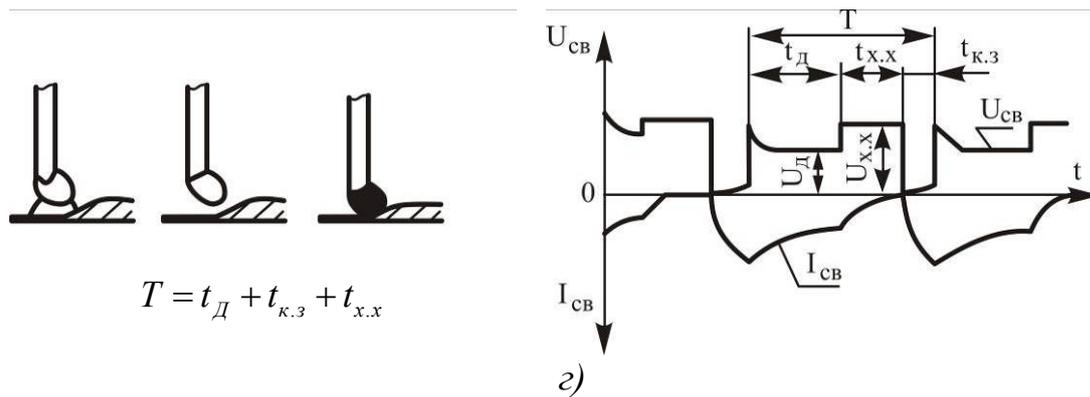


Рис. 1.11. Внешний вид разрядного промежутка и осциллограмм напряжения и силы тока при процессе с естественными короткими замыканиями (а), с непрерывным горением дуги и крупнокапельным переносом металла (б), с непрерывным горением дуги и мелкокапельным переносом металла (в), с непрерывным горением дуги и струйным переносом металла (г), с непрерывным горением дуги и струйно-вращательным переносом металла (д), где  $T$  – длительность цикла;  $t_{д}$  – длительность горения дуги;  $t_{к.з.}$  – длительность короткого замыкания;  $i_{д}$  – сила тока дуги

Сварка в защитных газах легко поддается управлению. Наибольшее распространение получила сварка тонкой проволокой с принудительными короткими замыканиями и импульсно-дуговая сварка (рис. 1.12).

Основным условием стабильности процесса сварки нестационарной дугой является строго закономерное изменение напряжения, силы тока и длины дуги, поэтому именно они определяют основные характеристики процесса (плавление и перенос электродного металла, проплавление детали и др.). При импульсной дуговой сварке управление производят путем импульсного повышения силы тока дуги.





$$T = t_{д} + t_{к.з} + t_{х.х}$$

Рис. 1.12. Внешний вид разрядного промежутка осциллограммы напряжения и тока при импульсно-дуговой сварке с непрерывным горением дуги (а); с принудительными короткими замыканиями при создании импульсов энергией противо-ЭДС индуктивности (б); при процессе с дополнительными импульсами плавления электрода и переносом капель в шов (в); с принудительными обрывами дуги (г):  $T$  – длительность цикла,  $t_{д}$  – длительность горения дуги,  $t_{к.з}$  – длительность короткого замыкания,  $I_{к.з}$  – максимальный ток короткого замыкания при перегорании шейки между каплей и электродом,  $I_{и}^{||}$  – амплитуда импульса тока, оплавливающего электрод;  $I_{и}$  – амплитуда импульса;  $t_3$  – время задержки подачи импульса плавления после окончания короткого замыкания;  $t_{и}$  – время задержки подачи импульса тока после начала короткого замыкания

**Основные виды импульсно-дуговой сварки следующие** (рис. 1.12): с непрерывным горением дуги; с принудительными короткими замыканиями дуги и с принудительными обрывами дуги. Процесс можно вести с наложением на дугу, как импульсов одинаковых параметров, так и групп импульсов с различными параметрами (рис. 1.13). В последнем случае энергию отдельных импульсов подбирают так, чтобы импульсы производили независимое управление отдельными явлениями при сварке. Например, при процессе с непрерывным горением дуги первый импульс А должен интенсивно расплавлять электрод, а второй Б – сбрасывать каплю с электрода в ванну, или же первые импульсы малой длительности В должны стабилизировать горение дуги на малых значениях силы тока, а последний в группе импульс Б – сбрасывать каплю с электрода.

Импульсно-дуговую сварку с непрерывным горением дуги и наложением импульсов тока по схеме (рис. 1.12, а) применяют при сварке в аргоне и смесях аргона с углекислым газом до 18% и аргона с кислородом. Схему на рис. 1.12, б широко используют при сварке проволокой диаметром 0,5–1,4 мм в  $CO_2$  и смесях аргона с углекислым газом более 20–25%. Этот вид сварки часто называют сваркой с частыми принудительными короткими замыканиями.

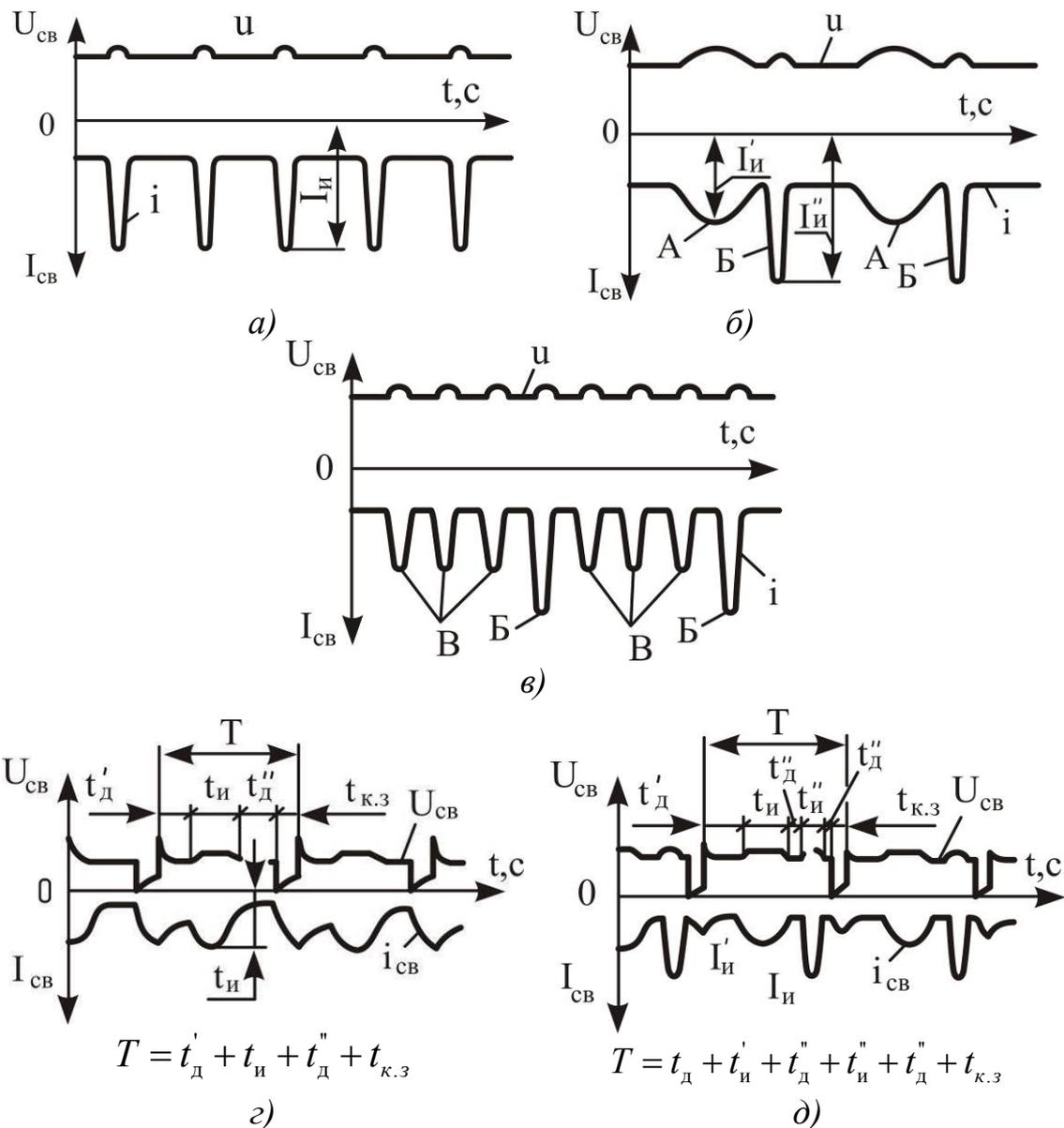


Рис. 1.13. Схемы изменения напряжения и силы тока при импульсно-дуговой сварке с импульсами одинаковых (а, г) и различных (б, в, д) параметров

При сварке тонкой проволокой принудительные короткие замыкания задают путем снижения тока дуги по определенной программе (рис. 1.12, б, в). Сварка с принудительными короткими замыканиями достигается также при механической пульсации и вибрации электрода, подаваемого к изделию вдоль его оси (рис. 1.12, в, г), что реализуется при вибродуговой наплавке.

Управление процессом можно выполнить путем наложения на электрод, дугу или сварочную ванну внешних стационарных, импульс-

ных или высокочастотных магнитных полей. При этом удается изменить характеристики дуги, перемещение дуги и капли на электроде, а также сварочной ванны на изделии. Процесс сварки можно регулировать, изменяя состав защитного газа или вводя с электродом вещества, изменяющие эффективный потенциал ионизации дугового газа или поверхностное натяжение жидкой капли, что нашло применение при сварке в смесях газов и при сварке порошковыми проволоками в защитных газах.

Кроме того, процесс можно изменить воздействием струи газа, подаваемой в зону сварки с большей скоростью (см. рис. 1.7, в). В этом случае изменяются характеристики дугового разряда, перенос электродного металла, погружение дуги в ванну, кристаллизация шва и др. [6, 11]. Механические колебания электрода или сварочной ванны дают возможность изменять характер переноса электродного металла, кристаллизацию шва и его химический состав, форму провара и др.

**Прекращение процесса сварки.** Эта стадия также оказывает большое влияние на качество сварного соединения. На практике применяют три способа прекращения процесса (рис. 1.14): отключением подачи электродной проволоки; разрывом цепи и после этого отключением напряжения источника питания и подачи защитного газа; снижением напряжения и силы тока сварки для заварки кратера (оптимальный вариант).

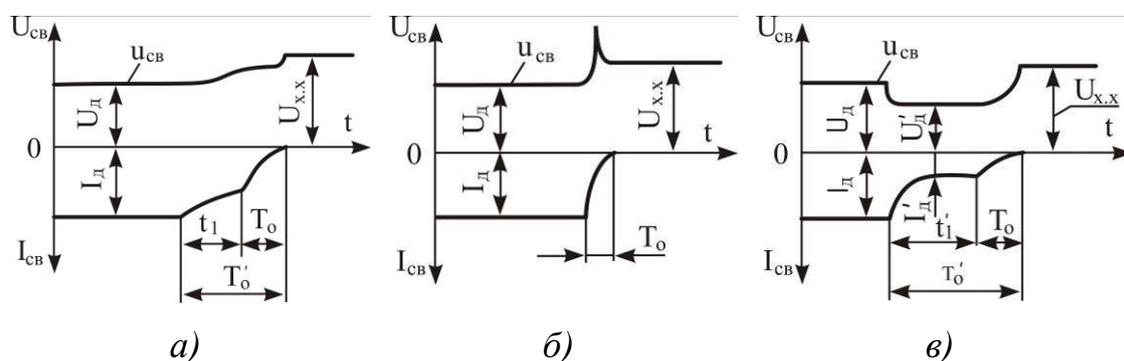


Рис. 1.14. Схемы изменения напряжения и силы тока при прекращении процесса сварки путем отключения подачи электрода (а), разрыва цепи (б) и снижения напряжения и силы тока для заварки кратера (в):  $T_0'$  – полная длительность прекращения процесса;  $T_0$  – длительность обрыва дуги;  $t_1$  – длительность торможения электрода;  $t_1'$  – длительность горения дуги пониженной мощности

Перенос металла с электрода на изделие является одной из важнейших характеристик сварки плавящимся электродом в защитных газах, он определяет технологические характеристики и области применения процессов сварки. Перенос металла может происходить в виде жидких капель различных размеров и пара. Основные виды переноса электродного металла были представлены выше (рис. 1.11 и 1.12). С учетом процессов сварки с управляемым переносом электродного металла в сварочную ванну, основные виды переноса электродного металла при дуговой сварке в защитных газах (рис. 1.15) следующие:

- 1) крупнокапельный с естественными короткими замыканиями разрядного промежутка;
- 2) крупнокапельный без коротких замыканий;
- 3) перенос каплями среднего размера без коротких замыканий;
- 4) струйный перенос электродного металла;
- 5) управляемый принудительный перенос каплями среднего размера без коротких замыканий;
- 6) перенос с принудительным короткими замыканиями разрядного промежутка каплями;
- 7) струйно-вращательный.

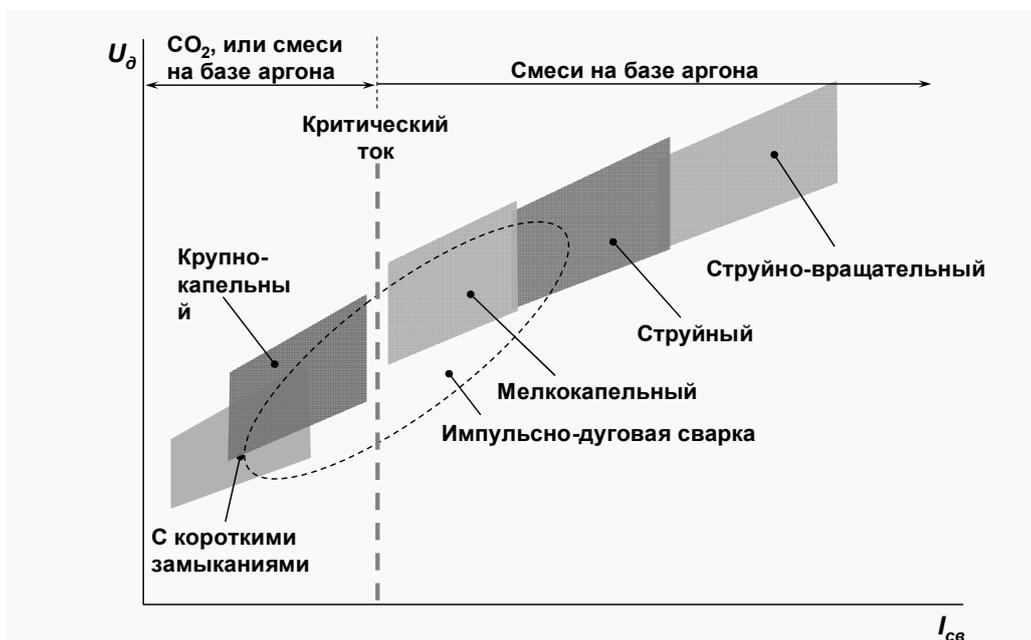


Рис. 1.15. Виды переноса электродного металла при сварке в защитных газах

Указанные виды переноса электродного металла могут быть получены при сварке с постоянной и пульсирующей скоростью подачи электродной проволоки. Характер переноса электродного металла определяется энергетическими параметрами режима сварки и зависит от

комплекса сил, действующих на каплю электродного металла, находящуюся на торце непрерывно подаваемого электрода.

### Комплекс сил, действующих на каплю электродного металла.

При сварке в защитных газах на каплю электродного металла действуют следующие силы: сила тяжести  $F_T$ , сила поверхностного натяжения  $F_{п.н.}$ , электродинамическая сила  $F_{э.д.}$ , реактивное давление испаряющегося с поверхности капли металла и выделения газа  $F_p$ , сила давления потоков плазмы дугового промежутка  $F_{пл.}$ .

При сварке плавящимся электродом в струйной газовой защите, при определенных условиях кроме основных сил, на каплю электродного металла существенное влияние оказывает сила действия струи защитного газа (рис. 1.16) [9-18] и инерция движения капли, например, при вибрации электрода [19]. Значительное влияние этой силы отмечено при двухструйной газовой защите в  $CO_2$  [11].

Крупными каплями будем считать капли диаметром более  $1,5d_э$ , средними – диаметром  $(0,7-1,5)d_э$ , мелкими – менее  $0,7d_э$ .

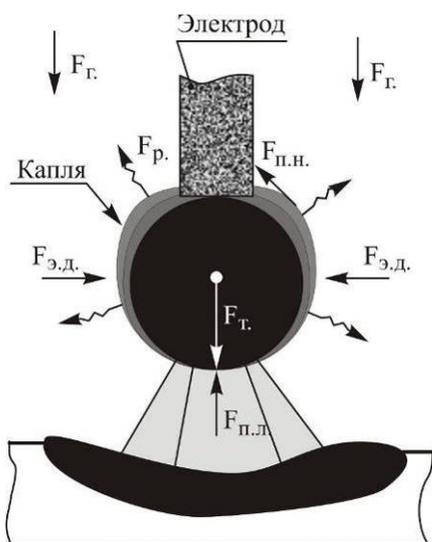


Рис. 1.16. Силы, действующие на каплю электродного металла

Сила тяжести  $F_T$  оказывает существенное влияние только при значительных размерах капель. В зависимости от пространственного расположения шва сила  $F_T$  способствует отрыву капли от электрода (в нижнем положении), препятствует отрыву (в потолочном) или стремится отклонить каплю относительно оси электрода (в вертикальном положении). При сварке в среде аргона капля электродного металла обычно имеет шарообразную форму. Аналитическое выражение для  $F_T$  в этом случае имеет следующий вид [19]:

$$F_T = \alpha \frac{4}{3} \pi R_k^3 \gamma g, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий часть жидкого металла, оставшегося на электроде;  $R_k$  – радиус капли;  $\gamma$  – средняя плотность металла при температуре жидкой капли;  $g$  – ускорение свободного падения.

Размер капли определяют по данным скоростной киносъемки или расчетным путем по скорости подачи проволоки и частоте переноса.

**Сила поверхностного натяжения**  $F_{\text{пн}}$  обычно препятствует переносу капель с электрода в ванну и зависит от состава электрода и защитного газа. Местом приложения  $F_{\text{пн}}$  может быть принято такое сечение на жидкой капле, в котором эта сила минимальна. До образования шейки местом приложения  $F_{\text{пн}}$  может быть принята плоскость, проходящая через границу между твердым и жидким металлом. В этом сечении силу  $F_{\text{пн}}$ , направленную по касательной к поверхности капли, можно разложить на составляющие: осевую  $F_{\text{пн}}(O)$ , удерживающую каплю на электроде, и радиальную  $F_{\text{пн}}(P)$ , стремящуюся сжать каплю и образовать шейку. Эти составляющие определим следующим образом [19]:

$$F_{\text{пн}}(O) = 2\pi\sigma R_3 \cos \varphi \quad (1.5)$$

$$F_{\text{пн}}(P) = 2\pi\sigma R_3 \sin \varphi \quad (1.6)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения материала электрода при заданной температуре в месте приложения силы;  $\varphi$  – угол между касательной к образующей поверхности электрода в месте перехода от твердого к жидкому металлу.

После образования шейки местом приложения силы можно считать плоскость, проходящую через минимальное сечение шейки жидкого металла. Размер каплей, отрываемых принудительно от электрода, влияет на соотношение сил  $F_{\text{пн}}(O)$  и  $F_{\text{пн}}(P)$  и отрыв каплей. Как правило, наиболее легкий отрыв каплей наблюдается при соотношениях радиуса капли  $R_k$  к радиусу электрода  $R_3$  в пределах 1,15–1,5.

При  $R_k/R_3 < 1,15$  значительно уменьшается сила  $F_{\text{пн}}(P)$  и увеличивается сила  $F_{\text{пн}}(O)$ , что затрудняет образование шейки и отрыв капли. При  $R_k/R_3 > 1,15$  размер каплей чрезмерно велик и принудительный отрыв их также затруднен. Определение силы  $F_{\text{пн}}$  затруднено в основном из-за отсутствия достоверных данных о коэффициенте поверхностного натяжения. Для стали литературные данные приводят значения коэффициента поверхностного натяжения от  $1000 \cdot 10^{-2}$  до  $1570 \cdot 10^{-2}$  Н/см [22]. Приблизительно коэффициент можно посчитать по формуле:

$$\sigma = 2,1 \frac{T_{\text{кр}} - T}{\left( M - \frac{1}{\gamma} \right)} \quad (1.7)$$

где  $T_{\text{кр}} = \frac{2}{3} T_{\text{кип}}$ ;  $T$  – температура капли;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения металла капли;  $\gamma$  – удельный вес;  $M$  – масса металла, испаряющегося с поверхности в единицу времени.

Коэффициент  $\sigma$  зависит от легирующих элементов, а также от окружающей каплю атмосферы. Кислород понижает поверхностное натяжение. Небольшое количество шлака на поверхности капля при сварке в защитных газах незначительно изменяет поверхностное натяжение. Изменение радиуса шейки при отрыве капли приводит к изменению  $F_{\text{пн}}$ .

**Электродинамическая сила  $F_{\text{эд}}$**  возникает при прохождении тока по проводнику из-за взаимодействия тока с собственным магнитным полем. Если сечение проводника постоянно, то эта сила направлена по радиусу к оси проводника и стремится его сжать. Осевая составляющая ее равна

$$F_{\text{эд}}(OP) = \frac{\mu\mu_0 i^2}{8\pi}, \quad (1.8)$$

где  $\mu$ ,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость материала (для дуговой сварки  $\mu_0 \approx 1$ ).

Если сечение проводника неодинаково по длине, то возникает осевое усилие  $F_{\text{эд}}(O)$ , направленное от меньшего сечения к большему. Это усилие на участке проводника радиусами  $R_1 < R_2$  можно записать так:

$$F_{\text{эд}}(O) = \frac{\mu\mu_0 i^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1.9)$$

Таким образом, осевая сила не зависит от направления тока. Изменение поперечного сечения проводника возможно в месте перехода от твердого электрода к жидкой капле и в месте перехода от капли к дуге. Местом приложения электродинамической силы при отрыве капли от электрода можно условно считать плоскость, в которой жидкая шейка минимальна, и в расчетах принимать  $R_1$  равным радиусу шейки, а  $R_2$  – равным радиусу активного пятна на капле.

**Реактивное давление испаряющегося металла и выделение газа  $F_p$ .** При сварке в среде защитных газов расплавленный металл на электроде и изделии в зоне активных пятен находится при температуре, близкой к температуре кипения. Поэтому с активных пятен происходит интенсивное испарение, а иногда и газовыделение. Потoki паров направлены перпендикулярно к испаряющейся поверхности, но поскольку пары в дуге ионизируются, дальнейшее направление потоков определяется направлением собственного или внешнего магнитного поля в дуге. Реактивную силу испарения можно вычислить по формуле

$$F_p = Mv, \quad (1.10)$$

где  $M$  – масса металла, испаряющегося с поверхности в единицу времени;  $v$  – начальная скорость струи пара.

**Сила давления потоков плазмы дуги  $F_{пл}$**  возникает в результате движения потоков плазмы, образующихся в районе активных пятен [4, 6, 23]:

$$F_{пл} = M_{пл} \cdot v_{пл}, \quad (1.11)$$

где  $M_{пл}$  – масса потока плазмы, проходящая через заданное сечение в единицу времени, кг;  $v_{пл}$  – скорость потока плазмы в заданном сечении, м/с.

Сила  $F_{пл}$  зависит от материала электродов и газовой среды, в которой горит сварочная дуга, и таким образом является одной из основных составляющих сил для всех сварочных дуг.

Известно [4, 6, 23], что плазменные потоки (катодный и анодный) направлены встречно-параллельно, при этом катодный поток охватывает анодный поток. При сварке в  $CO_2$  проволокой Св-08Г2С сварка ведется на обратной полярности, поэтому катодный плазменный поток направлен в сторону электродной проволоки. Капля электродного металла, выходя за пределы анодного потока, попадает во встречный плазменный поток (катодный), который препятствует ее переносу и тем самым увеличивает разбрызгивание электродного металла. Таким образом, снижение размера капли или расширение анодного потока улучшает перенос электродного металла.

**Сила взрыва жидкой перемишки между каплей и электродом или ванной  $F_{взр}$ .** Взрывообразное перегорание жидких мостиков между каплей и электродом или каплей и ванной является одной из основных сил, определяющих перенос и разбрызгивание при сварке в  $CO_2$ .

Разбрызгивание при сварке в защитных газах зависит от: рода защитного газа, вида процесса сварки и переноса электродного металла, диаметра, состава и типа электродной проволоки, наличия загрязнений на проволоке и свариваемом металле, качества защиты зоны сварки, техники сварки, статических и динамических свойств источника тока.

Анализ представленных сил, действующих на каплю электродного металла, показывает, что для получения управляемого переноса электродного металла необходимо создание таких условий, которые бы обеспечивали образование шейки по линии расплавления электрода и принудительное отделение капли электродного металла. Это может

быть достигнуто за счет значительного увеличения электродинамической силы  $F_{эд}$ , пропорциональной квадратичному значению сварочного тока. Следовательно, при значительном увеличении сварочного тока в импульсе может соответственно возрасти сила  $F_{эд}$ . В такие моменты времени она значительно преобладает над другими силами.

В случае сварки в среде аргона, когда столб дуги имеет расширяющуюся конусообразную форму, действие электродинамической силы таково, что она стремится оторвать каплю электродного металла и принудительно направить ее в сварочную ванну. Таким образом, при увеличении тока на интервале действия импульсов тока будет иметь место резкое увеличение электродинамической силы и направленный перенос электродного металла.

**Сила действия струи защитного газа  $F_{г}$  [11].** Сила направлена вдоль электрода к свариваемому изделию и способствует позиционированию капли вдоль оси электрода (рис. 1.16, 1.17).

Силу действия струи защитного газа на каплю электродного металла можно определить по формуле:

$$F_{г} = P c_x 2\pi r_k \sqrt{r_k^2 - r_э^2}, \quad (1.12)$$

где  $P$  – давление защитного газа на поверхность капли, Па;  $r_k$  – радиус капли, м;  $r_э$  – радиус сварочной проволоки, м;  $c_x$  – аэродинамический коэффициент сопротивления шара,  $c_x = 0,48$ .

Сила  $F_{г}$  зависит от способа и состава газовой защиты зоны сварки. Например, при сварке плавящимся электродом в  $CO_2$  на обратной полярности при традиционной одноструйной защите с расходом газа 20 л/мин она составляет  $8-9 \cdot 10^{-6}$  Н (рис. 1.17, а), а при двухструйной газовой защите (рис. 1.17, б) –  $100-110 \cdot 10^{-6}$  Н [11].

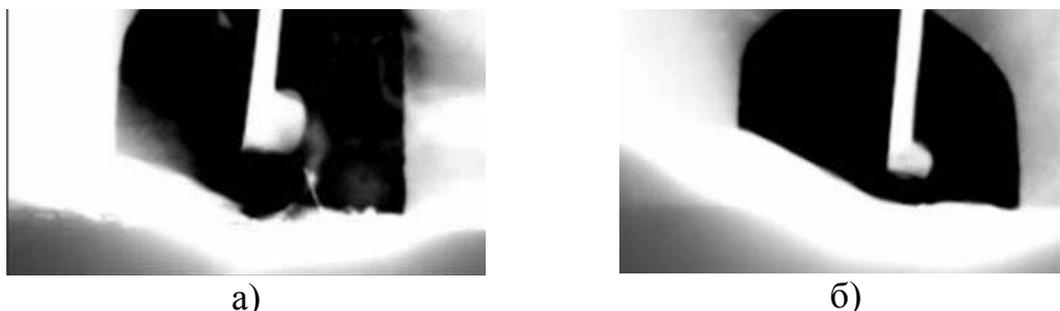


Рис. 1.17. Кадры скоростной видеосъемки (скорость 750 кад/с, камера «Видеоспринт»): а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита

С увеличением силы действия струи защитного газа на каплю электродного металла возрастает частота переноса капель с электрода в сварочную ванну и интенсивность протекания металлургических процессов на поверхности капли, уменьшается время перехода капли.

Результаты анализа кадров скоростной видеосъемки экспериментальных исследований (рис. 1.18) показали, что время существования капли при сварке в  $\text{CO}_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2мм ( $I = 200\text{А}$ ,  $U = 27\text{В}$ ,  $Q = 20$  л/мин,  $l = 12$  мм) при одноструйной газовой защите изменяется в пределах  $t_k = 65\text{--}100 \cdot 10^{-3}$  с, а при двухструйной газовой защите составляет  $t_k = 35\text{--}58 \cdot 10^{-3}$  с [11].

**Характеристики основных видов переноса.** При крупнокапельном переносе крупная капля образуется на электроде постепенно и долго удерживается на нем. Если капля больше длины разрядного промежутка, то переход ее в ванну сопровождается коротким замыканием разрядного промежутка и погасанием дуги. Если капля меньше длины разрядного промежутка, то переход ее в ванну происходит без короткого замыкания (рис. 1.19).

Основными силами, обуславливающими крупнокапельный перенос, являются силы тяжести, поверхностного натяжения и давления дуги. При сварке в углекислом газе основное влияние на перенос оказывают силы, обусловленные действием плазменных потоков и реакции испарения. Эти силы приподнимают каплю над ванной, отесняют ее с оси электрода и приводят в беспорядочное колебательное движение. Если капля оказывается ниже взрывающейся шейки, то она попадает в шов, если выше, то каплю выбрасывает за пределы ванны. При сварке в смеси углекислого газа с аргоном и углекислого газа с аргоном и кислородом отеснение капли дугой намного меньше и меньше разбрызгивание. При сварке в углекислом газе и его смесях с аргоном при определенных условиях (например, двухструйная защита или импульсная подача газа) сила действия струи защитного газа способствует уменьшению беспорядочного колебания капли, увеличению стабильности и частоты направленного переноса капель с электрода в сварочную ванну (рис. 1.18).

Процессы сварки с крупнокапельным переносом электродного металла применимы для сварки в нижнем положении. Размер капель при крупнокапельном переносе зависит от рода защитного газа, материала и диаметра электрода, напряжения дуги, силы тока и полярности. С повышением напряжения дуги, диаметра электрода и переходом на прямую полярность диаметр капель увеличивается. С увеличением силы тока диаметр капель уменьшается.

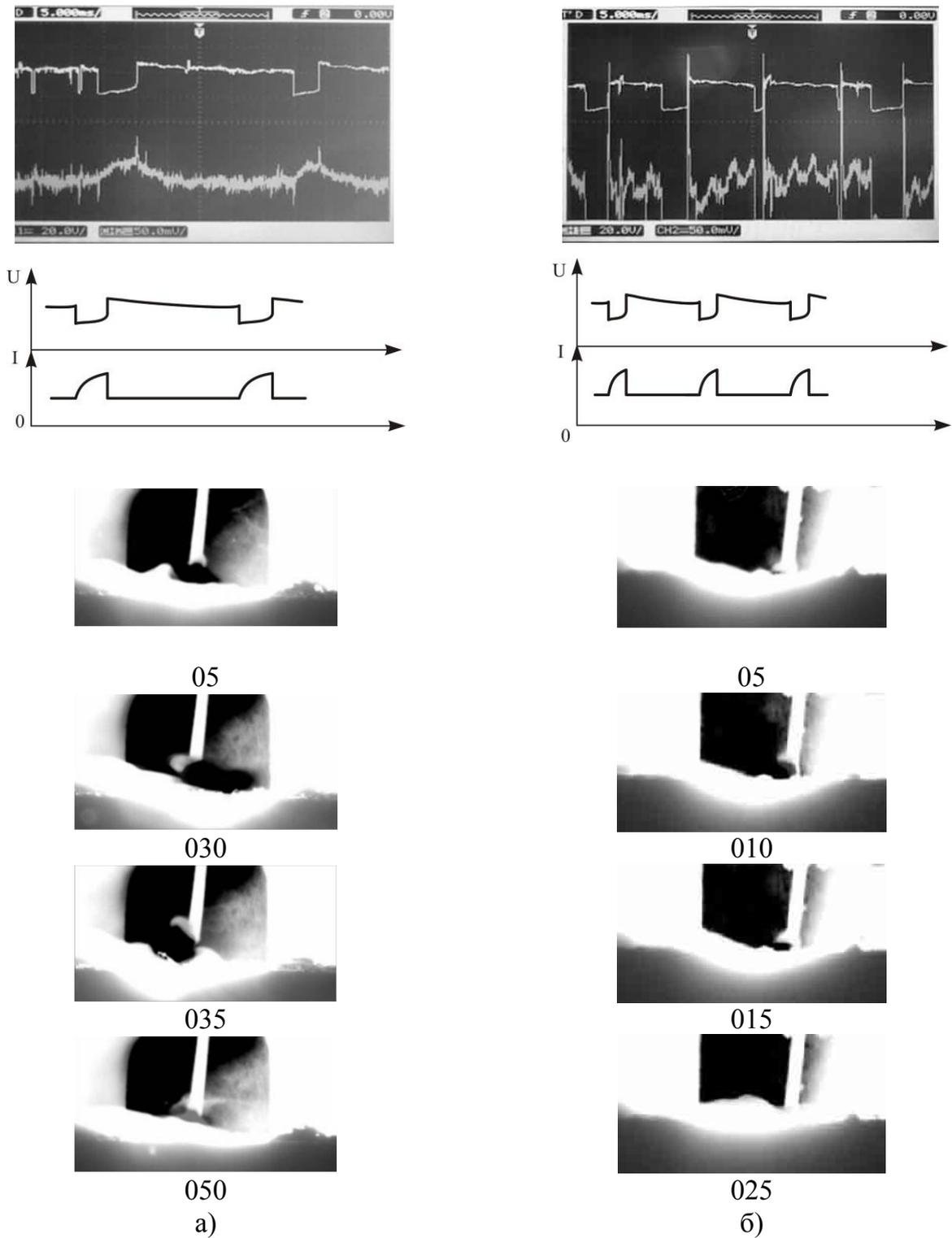
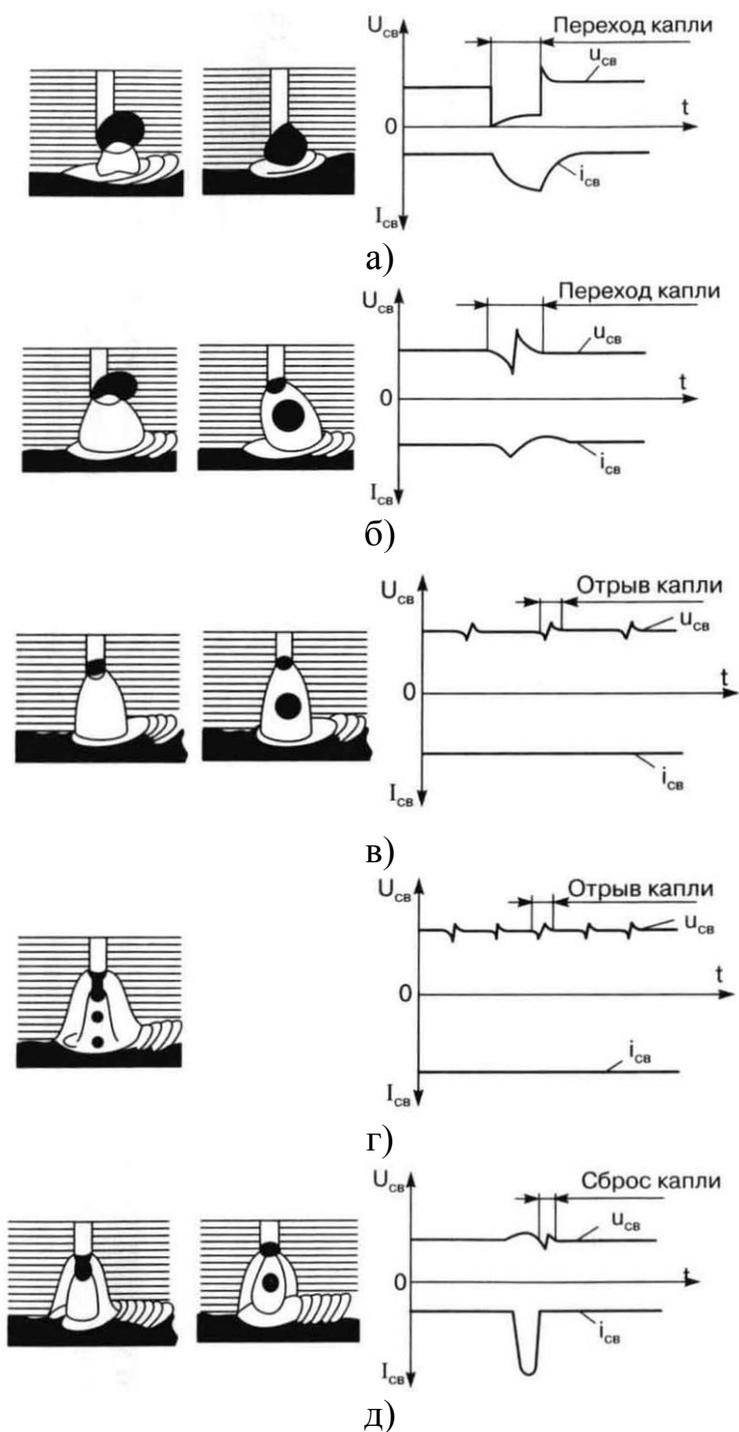


Рис. 1.18. Осциллограммы и кадры скоростной видеосъемки (скорость 750 кад/с, камера «Видеоспринт»): а) традиционная одноструйная газовая защита; б) двухструйная газовая защита

*Перенос каплями среднего размера* наблюдается при сварке в  $\text{CO}_2$  порошковыми проволоками рутилового типа (рис. 1.19, в). Дуга охватывает конец электрода. Основной силой, обеспечивающей отрыв капли от электрода, является электродинамическая сила. Препятствуют этому, в основном, силы поверхностного натяжения жидкого металла. Такой перенос наблюдается при средних значениях силы тока 250–400 А.



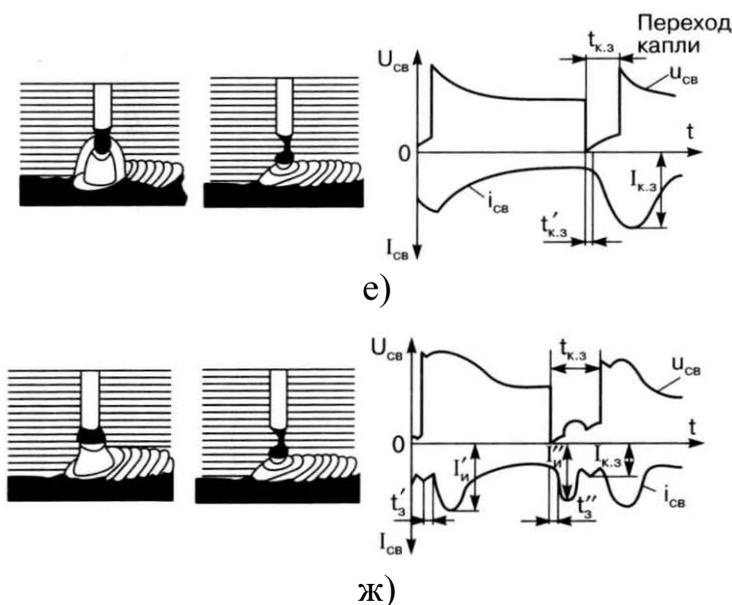


Рис. 1.19. Виды переноса электродного металла при сварке в защитных газах: а) крупнокапельный при естественных коротких замыканиях; б) крупнокапельный без коротких замыканий; в) каплями среднего размера; г) струйный; д) при импульсно-дуговой сварке непрерывно горящей дугой; е) путем программирования силы тока индуктивностью; ж) под действием импульса тока короткого замыкания при сварке с принудительным коротким замыканием

При *струйном переносе* жидкий металл на электроде вытянут в виде конуса, с конца которого отрываются мелкие капли (рис. 1.19, г). Оплавляющийся конец электрода также имеет конусообразную форму. Значительная доля электродного металла переносится в виде пара (до 20%). При струйном переносе электродного металла основными являются электродинамическая сила, сила поверхностного натяжения и, по-видимому, силы действия плазменных потоков. Предполагают, что существенно влияние реактивной силы испарения. Сила тяжести невелика, поэтому электродный металл переносится в ванну при сварке во всех пространственных положениях.

Минимальную силу тока, при которой наступает струйный перенос, называют критической силой тока  $I_{кр}$  [24]. С увеличением коэффициента поверхностного натяжения и диаметра электрода  $I_{кр}$  возрастает. Струйный перенос возможен при сварке на обратной и на прямой полярности. Обычно критическая сила тока и диаметр капель на прямой полярности больше, чем на обратной. С увеличением силы сварочного тока диаметр капель уменьшается, а частота переноса увеличивается (рис. 1.20).

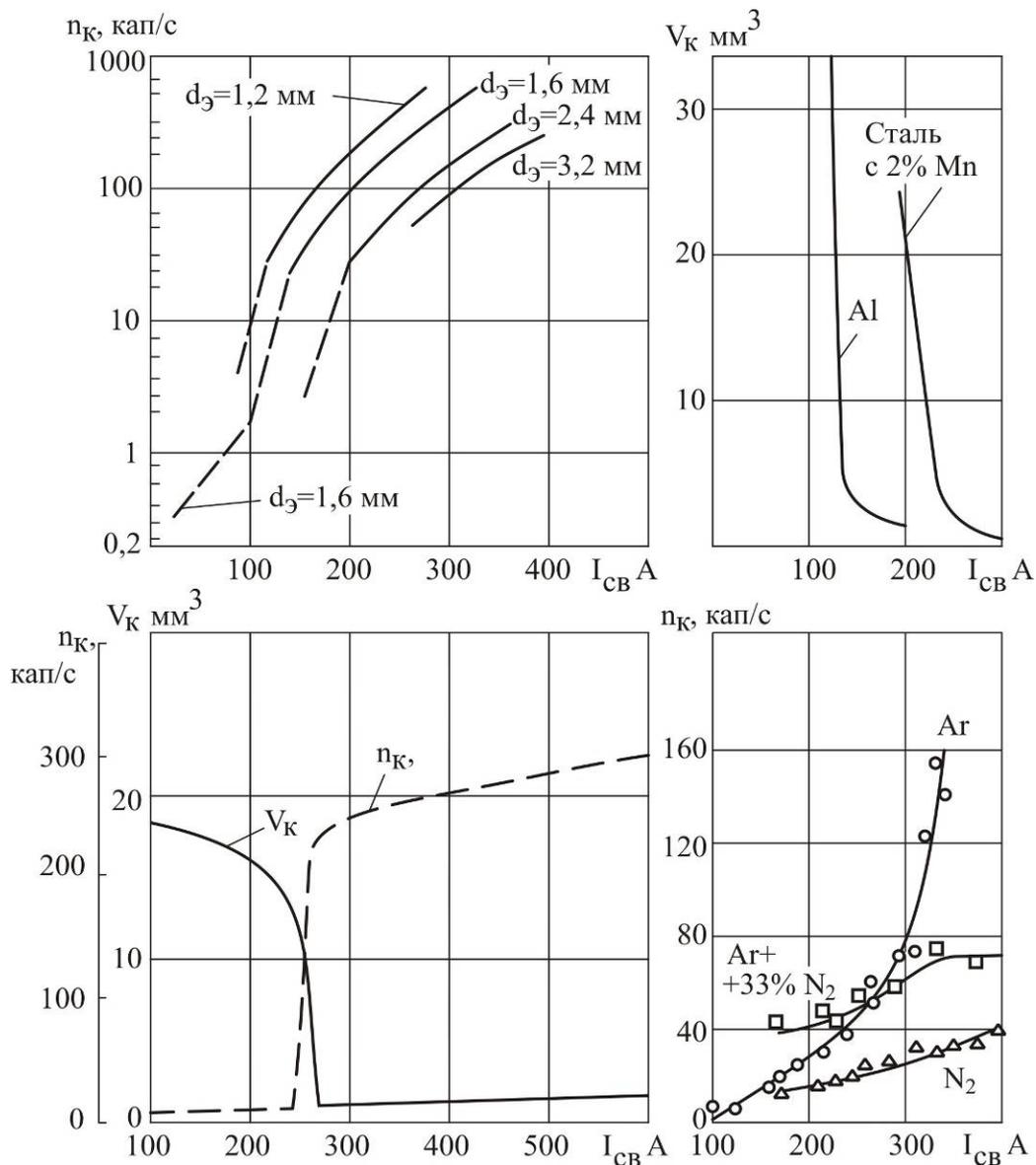
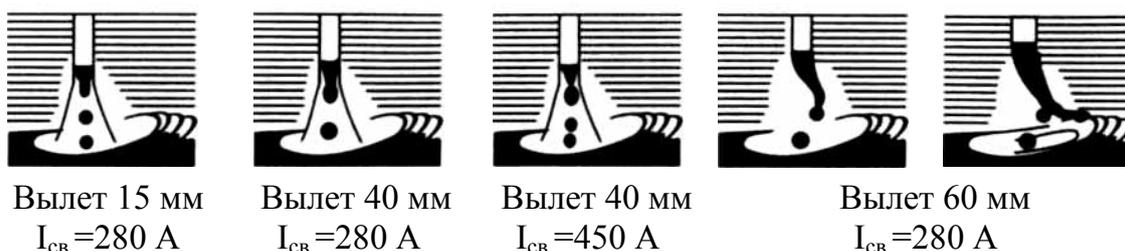


Рис. 1.20. Зависимость объема капель  $V_K$  и частоты переноса  $n_K$  от силы тока при сварке углеродистой стали в смеси Ar + 1% O<sub>2</sub>

При высоких значениях силы тока струйный перенос переходит во вращательно-струйный. Характерным при этом является значительная величина расплавленной конусообразной части электрода и вращение ее вокруг электрода. Капли отрываются от конца жидкой части и часто вылетают за пределы шва. Основное значение в переходе от струйного переноса к вращательно-струйному, по-видимому, имеют увеличение длины расплавленной части электрода, усилие взаимодействия тока, протекающего по этой части электрода, с собственным магнитным полем и возросшее с повышением силы тока реактивное усилие

испарения. В некоторых случаях при большой длине расплавленной части электрода наблюдается изгиб ее по спирали (рис. 1.21). Сила тока, при которой происходит переход от струйного к вращательно-струйному переносу, зависит от материала, диаметра и вылета электрода, предварительного разогрева электрода и напряжения дуги. Повышение напряжения и вылета электрода способствует переходу к вращательно-струйному процессу. В отличие от струйного переноса, при вращательно-струйном наблюдается периодическое нарушение процесса, выброс капель с конца электрода в сторону от шва.



*Рис. 1.21. Изменение переноса электродного металла с увеличением силы тока и вылета электрода. Обратная полярность, Ar+1% O<sub>2</sub>, проволока Св-08Г2С диаметром 1,6 мм*

*Управление переносом электродного металла.* При сварке стационарной дугой характер переноса в основном определяется силой тока и напряжением дуги, т.е. теми же параметрами, что и размеры шва. При сварке нестационарной дугой можно принудительно, независимо от силы тока и напряжения сварки, задавать желаемый вид переноса электродного металла, что позволяет расширить диапазон режимов и технологические возможности сварки в защитных газах плавящимся электродом.

При сварке в CO<sub>2</sub> проволокой диаметром 0,8–1,4 мм управляемый перенос каплей в ванну был получен при ведении сварки короткой дугой с принудительными короткими замыканиями за счет увеличения силы тока короткого замыкания с определенной скоростью (рис. 1.19, е). Переход капли в ванну достигался действием электродинамических сил, определяемых программой нарастания силы тока короткого замыкания и силой взрыва шейки между каплей и электродом. Препятствуют переходу каплей силы поверхностного натяжения. При малых скоростях нарастания силы тока короткого замыкания перенос капли в ванну достигается за счет наложения импульса тока при коротком замыкании (рис. 1.19, ж).

Это уменьшает максимальное значение силы тока короткого замыкания, силу взрыва шейки и разбрызгивание [6, 24]. При чрезмерном увеличении тока в начале короткого замыкания электродинамические силы препятствуют слиянию капли с ванной и приводят к перегоранию шейки между каплей и ванной.

При сварке в аргоне и смесях аргона с кислородом и аргона с  $\text{CO}_2$  до 18% управляемый перенос каплей в ванну был получен за счет импульсного повышения силы тока дуги. В этих газах с увеличением силы тока дуга охватывает оплавленный электрод. Отрыв каплей от электрода происходит под действием электродинамических сил. Препятствуют отрыву капли силы поверхностного натяжения (рис. 1.22). Сила тяжести невелика, принудительный перенос каплей возможен при сварке во всех положениях. Диаметр каплей  $d_k$  обычно задают  $(0,5-1,5) d_э$ . Если длина дуги больше  $(2-2,5) d_э$ , то перенос происходит без коротких замыканий разрядного промежутка, а если меньше, то с короткими замыканиями (рис. 1.19, д).

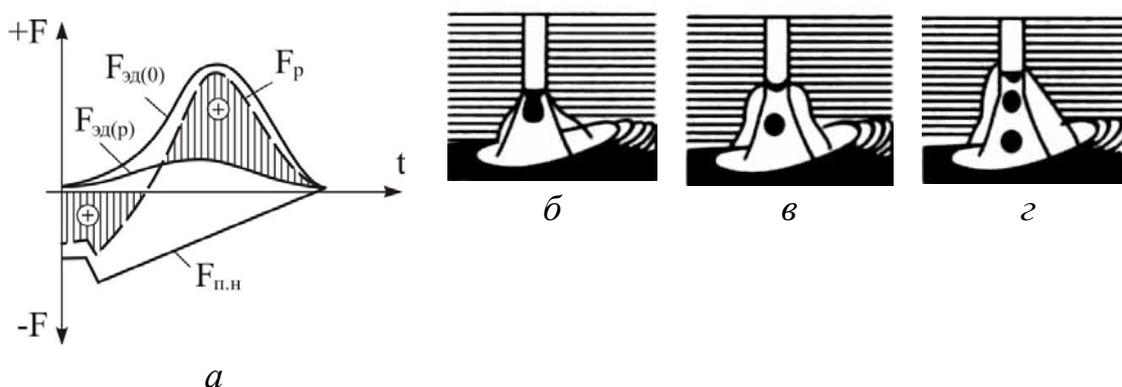


Рис. 1.22. Изменение сил, действующих на каплю во время импульса тока (а) и внешний вид дуги при действии импульса малой энергии, не отрывающего каплю (б), импульса средней энергии, отрывающего одну каплю (в), и импульса большой энергии, отрывающего по две капли с электрода (z)

Основные характеристики переноса при импульсно-дуговой сварке – диаметр каплей, частота переноса, скорость полета каплей и др. – определяются в первую очередь параметрами импульсов, а именно: энергией импульсов, характеризующей их амплитудой, длительностью и формой импульса, частотой следования импульсов. Критерием оценки переноса электродного металла может быть принят характер перемещения центра тяжести капли относительно конца электрода. Можно выделить три типичных вида переноса электродного металла:

- импульс тока не сбрасывает каплю с электрода;

- импульс тока сбрасывает с электрода только одну каплю (при сварке во всех пространственных положениях);
- импульс тока сбрасывает с электрода несколько капель.

В первом случае под действием электродинамических сил за время импульса тока капля вытягивается в направлении ванны. Однако приложенного усилия недостаточно для полного преодоления сил поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения и давление дуги возвращают каплю в первоначальное положение на электроде. Сброс капли с электрода происходит после воздействия на нее нескольких импульсов тока, когда размеры капли увеличатся. Диаметр сброшенных капель непостоянен. Скорость полета капель после отрыва от электрода невелика и составляет 40–70 см/с.

Во втором случае сброс капли происходит под действием электродинамической силы, которая преодолевает силы поверхностного натяжения, вытягивает жидкий металл и формирует каплю. В зависимости от параметров импульса отрыв капли возможен в конце импульса или спустя некоторое время после его окончания. Диаметр сброшенных капель постоянен. Скорость их полета после отрыва от электрода составляет 120–200 см/с. Оставшийся на электроде жидкий металл при отрыве капли подбрасывается вверх. При правильно подобранных параметрах импульсов разбрызгивание небольшое.

В третьем случае электрод интенсивно подплавляется, жидкий металл на электроде вытягивается в сторону ванны, капля отрывается от электрода до окончания импульса. После отрыва капли резко ускоряется оплавление электрода и формируется вторая капля, которая также сбрасывается с электрода. При очень больших импульсах наблюдается вытягивание жидкого металла на электроде в конус и сброс нескольких капель одним импульсом. Размер сбрасываемых капель различен. Скорость полета также неодинакова, но всегда больше 250 см/с. При таких скоростях капли, ударяясь о ванну, вызывают ее расплескивание и ухудшают формирование шва.

Для отрыва капли от электрода необходимо затратить определенную энергию, которую условно можно назвать «работой отрыва». При сварке в аргоне эту работу выполняет электродинамическая сила, а препятствует отрыву сила поверхностного натяжения. Капля после отрыва должна иметь определенную скорость, чтобы попасть в ванну на изделия при сварке во всех положениях.

Для расчета электродинамической силы, необходимой для отрыва капли, можно воспользоваться теоретическими положениями динамики точки переменной массы, причем количество движения капли принять равным импульсу равнодействующей электродинамической силы и си-

лы поверхностного натяжения. Считая начальную скорость капли относительно нерасплавленного торца электрода равной нулю, уравнение количества движения можно записать в виде:

$$M_k v_k = \int_{t_1}^{t_2} F_{эд}(t) dt - \int_{t_1}^{t_3} F_{п.н}(t) dt \quad (1.13)$$

где  $M_k$  – масса капли;  $v_k$  – скорость капли в момент отрыва, можно принять  $a_k=120-200$  см/с;  $F_{эд}(t)$  – электродинамическая сила;  $F_{п.н}(t)$  – сила поверхностного натяжения.

Установлено, что наиболее приемлемыми являются импульсы средних энергий, сбрасывающие с электрода по одной капле. Абсолютные значения параметров этих импульсов зависят от рода защитного газа, материала и диаметра электродов, частоты следования импульсов, силы тока и напряжения сварки. Соотношения между величиной и длительностью импульса выбирают с учетом ряда технологических факторов, например толщины металла, необходимой глубины провара, положения шва в пространстве и др. В общем случае необходимая для сброса каплей величина импульса тока пропорциональна критическому току сварки в защитных газах стационарной дугой. Исследования показали, что направленный сброс каплей может быть получен во всех пространственных положениях на токах сварки от  $I_{св} = 0,4 I_{кр}$  до  $1,2 I_{кр}$ . При сварке с импульсами, сбрасывающими по одной капле, частота переноса и размер каплей задаются частотой следования импульсов. На практике сварку ведут с частотами следования импульсов 25–150 имп/с, а наиболее часто – 50 и 100 имп/с.

Разбрызгивание при сварке в защитных газах зависит от рода защитного газа, вида процесса сварки и переноса электродного металла, диаметра электрода и техники сварки, состава и типа электродной проволоки, наличия загрязнений на проволоке и свариваемом металле, качества защиты зоны сварки и свойств источника питания током.

При сварке в  $CO_2$  и смесях аргона с углекислым газом (более 20%) проволоками диаметром 0,8–1,4 мм на режимах с принудительными короткими замыканиями разбрызгивание зависит от скорости нарастания тока короткого замыкания, напряжения, тока сварки и вылета электрода. При оптимальных скоростях нарастания тока короткого замыкания, оптимальных напряжениях дуги, зависящих от тока сварки, а также малых вылетах разбрызгивание происходит в результате выброса мелких каплей и паров, образующихся при перегорании шейки между

капель и электродом. Потери составляют 3–4% при сварке в  $\text{CO}_2$  и 2–3% при сварке в смеси аргона с  $\text{CO}_2$  (15–25%).

При сварке с короткими замыканиями при высоких скоростях нарастания  $I_{к.з}$  больше рекомендуемых быстрое нарастание силы тока в начале короткого замыкания капли с ванной приводит к значительной электродинамической силе, препятствующей переходу капли в ванну. Жидкий мостик между каплей и ванной быстро перегревается и перегорает со взрывом. В результате каплю отбрасывает от ванны, и она вылетает за пределы шва. Происходит расплескивание сварочной ванны. При чрезмерно малых скоростях нарастания  $I_{к.з}$  затягивается переход капли в ванну при коротком замыкании, в результате чего нерасплавленный конец электродной проволоки погружается в ванну жидкого металла, которая при погасании дуги движется навстречу электроду. Нерасплавленный электрод упирается в дно ванночки, изгибается, разогревается медленно на большой длине, а затем перегорает со взрывом и выбрасывается за пределы шва.

Для получения стабильного процесса и уменьшения разбрызгивания при питании от источников с низкими скоростями нарастания силы тока короткого замыкания рекомендуется ускорять переход капель при коротких замыканиях путем наложения короткого импульса при коротком замыкании и импульса тока после перехода капли в шов и зажигания дуги (рис. 1.19, ж) [6, 25].

С повышением напряжения и вылета электрода, а также увеличением диаметра электрода более 1,6 мм увеличивается длина дуги, отеснение капли от ванны и ее колебания. Если перед отрывом от электрода крупная капля оказывается над взрывающейся шейкой, то силой взрыва шейки капля выбрасывается за пределы шейки. Крупные капли, обладающие большим теплосодержанием, прочно привариваются к кромкам изделия. Для уменьшения приваривания брызг кромки изделия покрывают различными покрытиями [26, 27].

Все факторы, приводящие к увеличению длины дуги и ее неустойчивости, увеличивают вероятность выброса крупных капель. Нарушение защиты зоны сварки, попадание в зону сварки воздуха, азота и водорода из загрязнений и ржавчины на проволоке и свариваемых кромках увеличивают разбрызгивание за счет взрыва крупных капель и выплесков из капли и ванны.

Питание от источников с комбинированной внешней характеристикой с падением  $k=0,08...0,15$  В/А в диапазоне рабочих значений силы тока приводит к уменьшению отеснения капель от ванны (рис. 1.23) и уменьшению выброса крупных капель. Одновременно отмечено уменьшение колебания капли, а также улучшение формирования шва [7, 28].

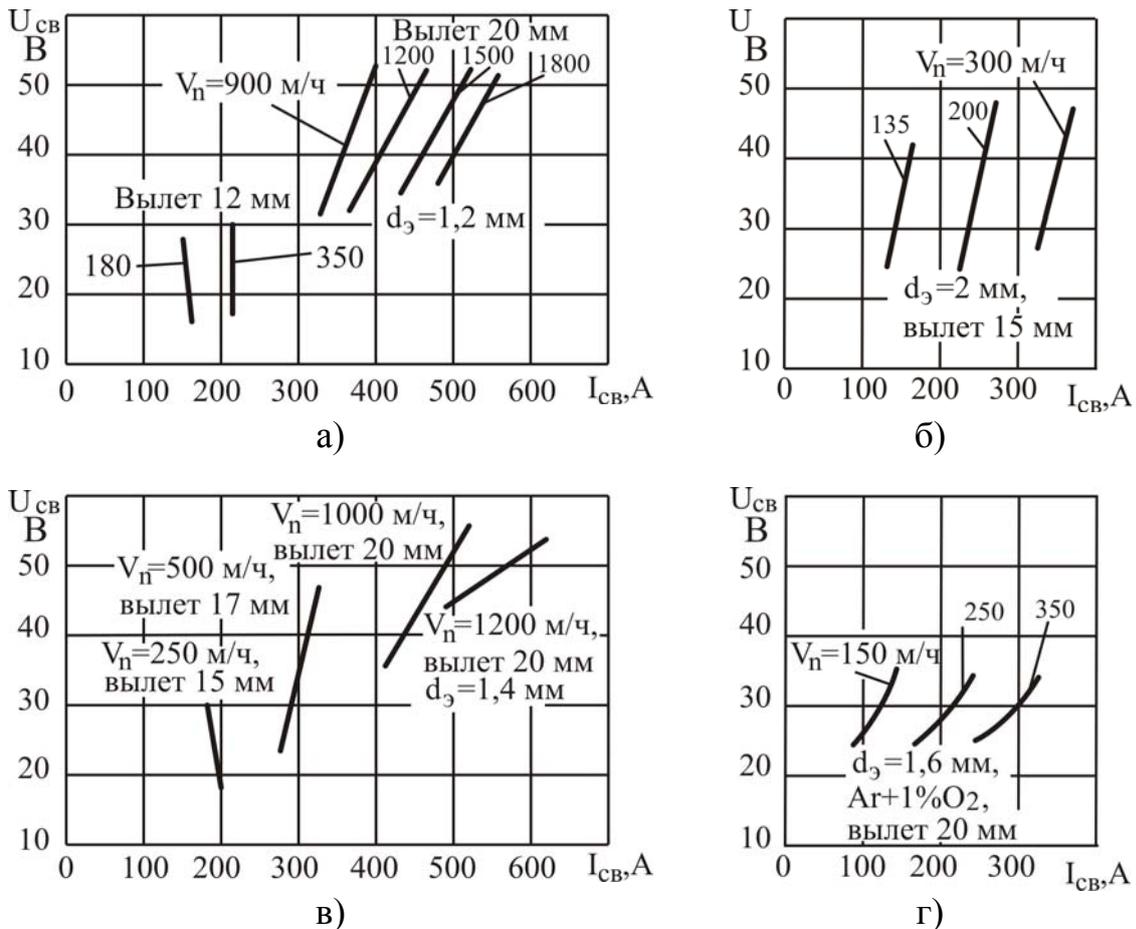


Рис. 1.23. Вольтамперные характеристики устойчивого течения процесса сварки  $CO_2$  (а, б, в) и в аргоне + 1%  $O_2$  (г). Проволока Св-08Г2С, обратная полярность

С увеличением тока увеличивается погружение дуги в ванну. В результате уменьшается вероятность выброса крупных капель за пределы ванны и разбрызгивание, но ухудшается форма шва. Для улучшения формы шва рекомендуется выполнять сварку с низкочастотной модуляцией на двух режимах – малом и большом.

При сварке в смесях аргона с углекислым газом (20–25%) давление дуги меньше, чем в  $CO_2$ . При сварке на средних токах это приводит к снижению разбрызгивания за счет уменьшения оттеснения капель от ванны и выброса крупных капель. Однако сварка в смесях аргона подвержена влиянию магнитного дутья. В этом случае разбрызгивание увеличивается.

При сварке в смесях аргона с кислородом, аргона с углекислым газом до 18% и аргона с углекислым газом до 18% и кислородом 3–5% на режимах струйного переноса электродного металла выброса капель

из зоны сварки нет. Потери электродного металла происходят за счет испарения и окисления и составляют 2–3%.

При импульсно-дуговой сварке в смесях аргона с углекислым газом до 18% и аргона с кислородом потери электродного металла происходят за счет его испарения и окисления. Потери меньше, чем при сварке со струйным переносом на постоянном токе.

Разбрызгивание в начале сварки проволоками сплошного сечения зависит от динамических свойств источника тока и техники начала сварки. При низких скоростях нарастания тока короткого замыкания в начале сварки наблюдается выброс начального участка электрода. При окончании сварки на повышенном напряжении наблюдается выброс крупной капли.

## ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ СТАЛЕЙ

### 2.1. Сварка в $\text{CO}_2$ тонкой проволокой 0,5–1,4 мм

Изучение процесса сварки с короткими замыканиями дугового промежутка в основном было начато в 50-е годы, когда советскими учеными К.В. Любавским и Н.М. Новожиловым был предложен способ сварки в защитной среде углекислого газа. Дальнейшему изучению этого процесса были посвящены основополагающие работы как советских ученых: Акулова А.И., Дудко Д.А., Зарубы И.И., Потапьевского А.Г. Дюргерова Н.Г., так и зарубежных: Вайншенка Г.Е., Смита А.А., Шельгазе М., Ямомото Т.

В этих работах показано, что в широком диапазоне технологически важных режимов сварки в среде углекислого газа перенос электродного металла осуществляется во время коротких замыканий дугового промежутка, которые энергетически необходимы для процесса сварки короткой дугой. Кроме того, в них сформулированы требования к статическим и динамическим свойствам источников питания, найдены области устойчивых режимов сварки, определены необходимые условия стабильности процесса сварки в целом, а также причины повышенного разбрызгивания электродного металла.

При сварке в углекислом газе на практике применяют процесс с частыми принудительными короткими замыканиями проволоками диаметром 0,5–1,4 мм, процесс с крупнокапельным переносом электродного металла проволоками диаметром 1,6–2,0 мм и сварку порошковой проволокой. Области режимов сварки, зависят от диаметра электрода, тока и напряжения (табл. 2.1).

Процесс с частыми принудительными короткими замыканиями реализуется при питании от источников с жесткой, пологопадающей и комбинированной внешней характеристикой и высокими скоростями нарастания тока короткого замыкания на низких напряжениях дуги. Характерные осциллограммы такого процесса приведены на рис. 2.1. Весь процесс можно разделить на ряд подобных циклов.

Процесс сварки в среде углекислого газа с переносом электродного металла во время коротких замыканий дугового промежутка, является наиболее распространенным в сфере реального промышленного производства. В этой связи остановимся несколько более подробно на особенностях этого режима процесса сварки в среде углекислого газа.

Таблица 2.1

Диапазон силы сварочного тока при сварке в углекислом газе проволокой Св-08Г2С (обратная полярность)

Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А			
	С короткими замыканиями	С крупнокапельным переносом	Погруженной дугой	Порошковой проволокой
0,5	<u>30-100</u> 15-100	-	-	-
0,8	<u>65-130</u> 20-130	<u>50-160</u> 50-180	-	-
1,0	<u>75-150</u> 30-140	<u>85-180</u> 70-200	-	-
1,2	<u>85-160</u> 40-160	<u>100-280</u> 100-280	<u>300-400</u> 280-400	<u>140-200</u> 120-200
1,4	<u>90-190</u> 45-190	<u>120-350</u> 150-400	<u>320-500</u> 300-550	-
1,6	-	<u>190-350</u> 160-350	<u>350-600*</u> 320-600*	<u>180-300</u> 180-300
2,0	-	<u>220-550</u> 200-600	<u>400-800*</u> 350-800*	<u>250-350</u> 250-350
3,0	-	<u>250-600</u> 220-600	<u>500-1200*</u> 400-1200*	<u>300-400</u> 300-400

Примечание: 1. В числителе приведены значения при питании от источника с плогопадающей ВАХ  $k = -(0,02...0,04) В/А$ , в знаменателе – при питании от источника с комбинированной ВАХ  $k = -(0,1...0,15) В/А$ .  
2. Знаком \* отмечены ориентировочно верхние пределы.

Исходя из анализа многочисленных кинограмм и осциллограмм [6, 29], включая полученные нами (рис. 2.2), схему одного микроцикла процесса с частыми короткими замыканиями можно представить следующим образом.

Тепло, выделяемое дугой после её зажигания, интенсивно расплавляет электродную проволоку, непрерывно подаваемую к детали, и деталь. Длина дуги быстро увеличивается в результате оплавления электрода и погружения дуги в ванну. На торце электрода образуется капля электродного металла, которая вследствие комплекса сил, действующих на неё, вытесняется на его боковую поверхность. По мере увеличения объема капли, и уменьшения тока скорость расплавления электродной проволоки и давление дуги уменьшаются. Капля расплавленного металла, находящаяся на торце непрерывно подаваемого электрода, и сварочная ванна приближаются друг к другу и замыкают дуговой промежуток. В начальной стадии короткого замыкания под действием сил поверхностного натяжения происходит слияние капли с ванной. Далее по мере

развития контакта образуется перемычка, которая сжимается под действием электромагнитных сил.

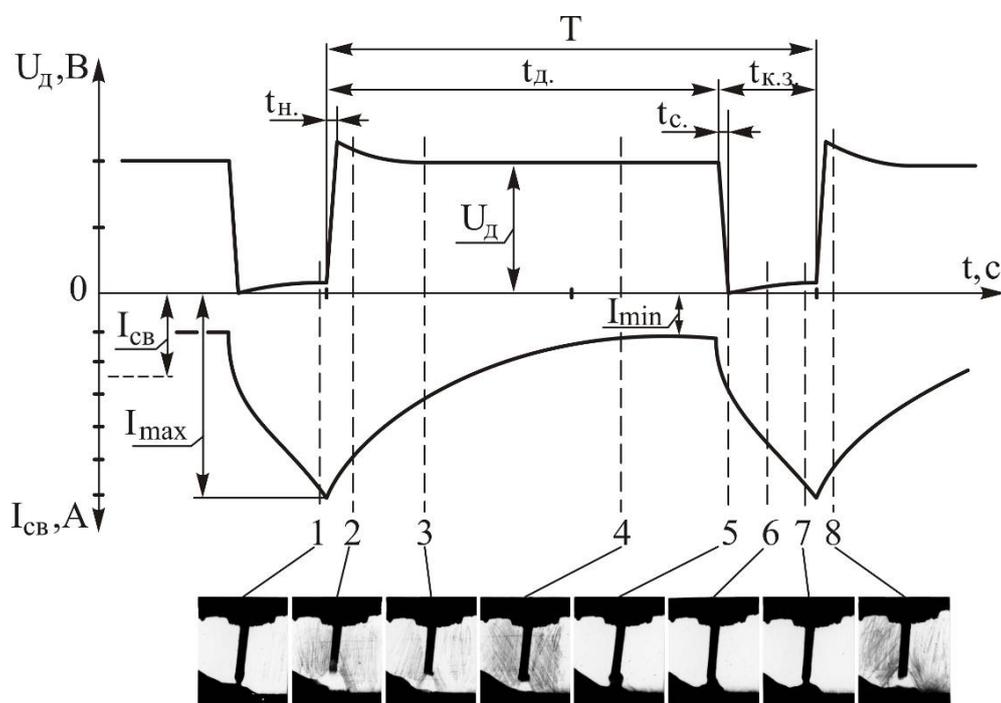


Рис. 2.1. Схема изменения напряжения и силы тока на протяжении одного цикла при сварке в углекислом газе с принудительными короткими замыканиями и характерные фотографии разрядного промежутка:  $t_n$ ,  $t_c$  – длительность соответственно нарастания и спада напряжения

В результате их действия между электродом и каплей образуется шейка, которая интенсивно разогревается джоулевым теплом и разрушается. Под действием электромагнитных сил, возникающих в момент повторного возбуждения дуги, металл ванны оттесняется в хвостовую часть. Энергия, накопленная в индуктивном сопротивлении сварочной цепи, выделяется на дуговом промежутке и совместно с током, протекающим в цепи за счет электродвижущей силы (ЭДС) источника питания, обеспечивает плавление электродной проволоки и основного металла. Параметры индуктивного сопротивления сварочной цепи определяют скорость нарастания тока короткого замыкания и его спада во время горения дуги, от которых зависит стабильность процесса сварки и разбрызгивание электродного металла.

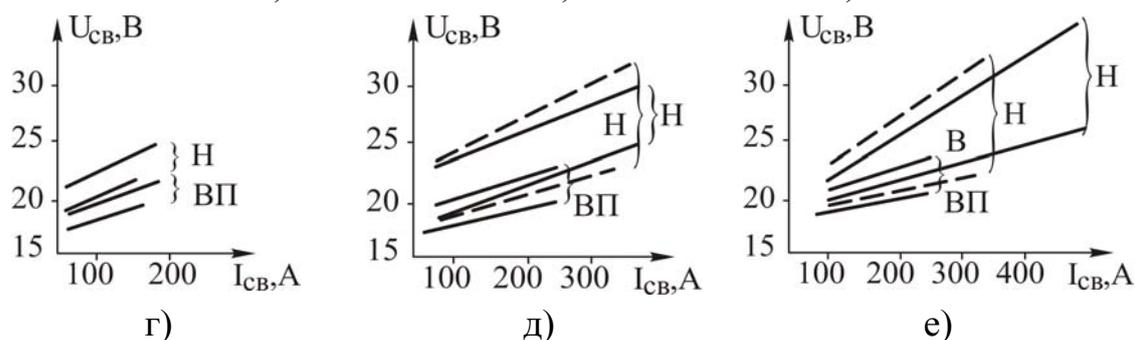
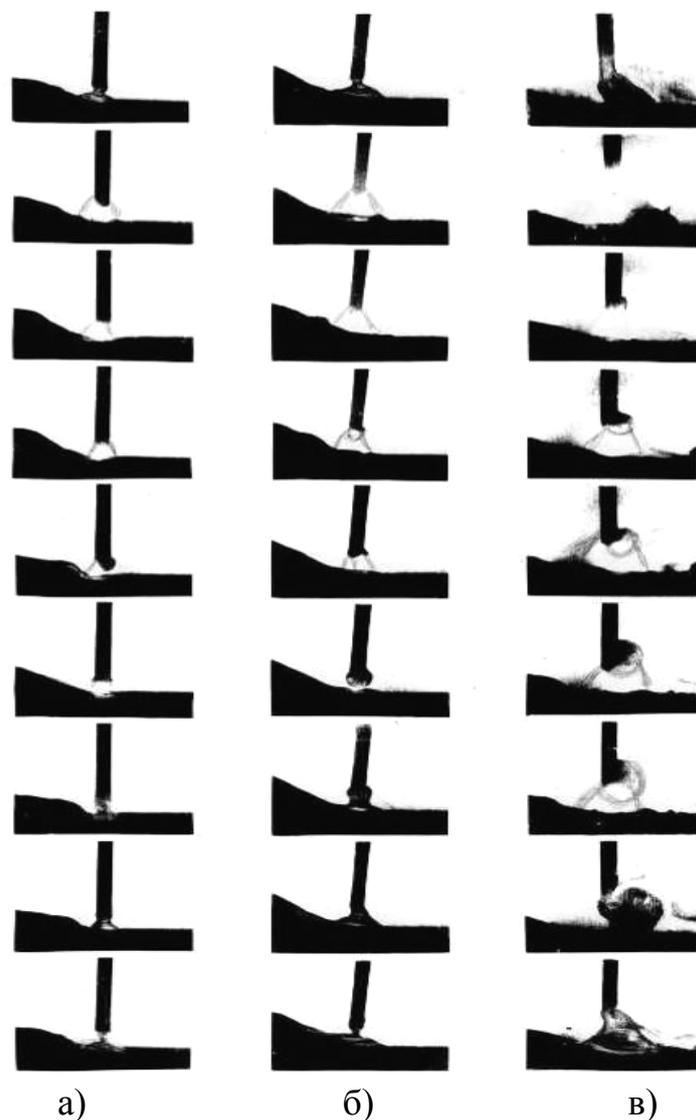


Рис. 2.2. Кинограмма сварки в  $CO_2$  с принудительными короткими замыканиями проволокой Св-08Г2С диаметром 0,8 мм при напряжении 17 В (а), 20 В (б), 24 В (в) и диапазоны оптимальных соотношений напряжений и токов сварки проволокой диаметром 0,8 мм, 1,2 мм и 1,4 мм (соответственно г–е) при питании от источника тока с плогопадающей (сплошные линии) и комбинированной (пунктирные линии) характеристикой (обратная полярность; Н – в нижнем положении; ВП – в вертикальном и потолочном положении)

Исходя из рассмотренной схемы процесса сварки, можно выделить две основные стадии в пределах одного микроцикла:

1. Стадия короткого замыкания, во время которой происходит перенос электродного металла;

2. Стадия горения дуги, на интервале которой происходит расплавление электродного металла.

Причем весь процесс сварки представляет собой протекание периодически повторяющихся микроциклов. Основными параметрами данного процесса являются: среднее напряжение процесса сварки  $U_{св}$ ; средняя сила тока процесса сварки  $I_{св}$ , среднее напряжение дуги  $U_{д}$ ; максимальная сила тока  $I_{max}$ ; минимальная сила тока  $I_{min}$ ; длительность горения дуги  $t_{д}$ ; длительность короткого замыкания  $t_{к.з}$ ; длительность цикла  $T = t_{д} + t_{к.з}$ ; скорость нарастания силы тока при коротком замыкании разрядного промежутка капель  $dI_{кз}/dt$  и скорость спада силы тока при горении дуги  $dI_{д}/dt$ .

## **2.2. Особенности сварки проволоками сплошного сечения диаметром 1,6–2,5 мм**

Во всем диапазоне режимов стабильный процесс сварки в  $CO_2$  проволоками Св-08Г2С протекает с крупнокапельным переносом электродного металла. На токах 150–200 А и низких напряжениях сварка сопровождается короткими замыканиями дуги. С увеличением напряжения на дуговом промежутке число коротких замыканий уменьшается, а диаметр капель увеличивается. При высоких значениях напряжения на дуговом промежутке процесс протекает без коротких замыканий.

Во время перехода капли при коротком замыкании жидкая перемычка между электродом и каплей перегорает со взрывом. Силой взрыва жидкая перемычка и часть жидкого металла с электрода выбрасывается за пределы жидкой ванны.

При протекании процесса без коротких замыканий длинная дуга приподнимая каплю над ванной часто смещается, что приводит к колебанию капли на электроде. Отрыв капли происходит под действием силы взрыва шейки между каплей и электродом. В зависимости от случайного расположения капли, капля попадает в ванну или выбрасывается за ее пределы. При сварке в  $CO_2$  проволоками диаметром 1,6 мм и более токи стабильного режима сварки и напряжение дуги больше, чем при сварке тонкими проволоками (табл. 2.2). Давление дуги с увеличением тока увеличивается и на электроде формируются крупные капли. Оттесняемые от ванны давлением дуги капли смещаются с оси элек-

трода и беспорядочно колеблются. При переходе в ванну шейка между каплей и электродом образуется сбоку от оси электрода и, при перегорании шейки, силой взрыва капля часто выбрасывается за пределы ванны. Поскольку размеры шейки и токи стабильных режимов сварки большие, чем при сварке тонкими проволоками, то больше и сила взрыва и разбрызгивание. Для уменьшения разбрызгивания при сварке в  $CO_2$  проволокой диаметром 1,6–2,5 мм в нижнем и наклонном положениях при питании от выпрямителей типа ВС или ВДГ последовательно в сварочную цепь включают дроссель индуктивностью 1,5–2 МГн, который в начале на 1–2 с шунтируют силовым контактором, например КМ-400 или КМ-600. С повышением тока и напряжения число выброшенных капель и разбрызгивание увеличиваются. Уменьшение разбрызгивания достигается при питании от источников с низкими динамическими свойствами. Однако для улучшения начала сварки в начале необходимо обеспечивать увеличение скоростей нарастания тока короткого замыкания. При сварке в  $CO_2$  с увеличением тока (табл. 2.2) увеличивается погружение дуги в ванну и разбрызгивание уменьшается. При сварке в  $CO_2$  погруженной дугой швы формируются узкими с глубоким проваром и повышенным усилением. Для улучшения формирования шва рекомендуют вести сварку полупогруженной дугой в режимах, при которых внешняя составляющая дуги 2–3 мм. Выполнять сварку с низкочастотной модуляцией на двух режимах. Первый – на малом токе и напряжении и второй – полупогруженной дугой.

Таблица 2.2

*Диапазоны токов сварки в  $CO_2$  полупогруженной дугой (проволока Св-08Г2С, полярность обратная).*

Диаметр электрода, мм	Ток сварки, А	Ориентировочные скорости подачи проволоки, м/ч	Разбрызгивание, %
1,2	240–350	650–1200	2–3
1,4	260–400	580–1000	2–4
1,6	300–500	380–900	3–4
2,0	350–550	350–700	4–5

Режимы сварки погруженной и полупогруженной дугой рекомендуют применять для сварки коротких швов на толстой стали. Например, сварку толстой строительной арматуры с принудительным формированием шва, а также для сварки вертикальных швов с принудительным формированием и добавкой небольшого количества флюса для улучшения формирования шва.

*Струйный процесс сварки в CO<sub>2</sub>* может быть получен при использовании проволок сплошного сечения активированных цезием, рубидием и другими элементами. Сварку ведут на прямой полярности. Процесс во многом подобен сварке в аргоне, но протекает в узком диапазоне силы тока.

На основе анализа литературы и опыта применения сварки в CO<sub>2</sub> [1–11] можно утверждать: при сварке проволоками диаметром 0,5–1,4 мм типа Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-10ГСМТ, Св-08Г2С, согласно ГОСТ 2246-70, без загрязнения, на режимах с частыми короткими замыканиями, при защите дуги углекислым газом (двуокисью углерода высшего и первого сорта, согласно ГОСТ 8050-83), обеспечении качественной защиты зоны сварки, при питании от источников тока с «оптимальными» динамическими свойствами и пологопадающей внешней характеристикой, без нарушения скорости подачи, в диапазоне токов до 180–250 А (в зависимости от диаметра электрода), при поддержании постоянными «оптимальных» напряжений и вылетов электрода возможно получение качественных сварных соединений без дефектов во всех пространственных положениях и минимального разбрызгивания 4–6 %.

Наблюдаемое на многих предприятиях более высокое разбрызгивание при полуавтоматической сварке вызвано недостаточным соблюдением режимов и техники сварки, использованием не настроенного универсального оборудования, а также несоблюдением основных правил организации работ (отсутствие контроля за приобретаемым газом и электродными проволоками, некачественной подготовкой и сборкой соединений, недостаточным текущим контролем режимов и техники сварки, прежде всего напряжения сварки).

В диапазоне токов от 260–350 А сварка в CO<sub>2</sub> тонкими проволоками 1,2–1,4 мм сопровождается повышенным разбрызгиванием. При необходимости выполнения сварки в этом диапазоне токов при сварке в нижнем и наклонном положении на спуск может быть применена сварка проволокой Св-08Г2СА диаметром 1,6–2 мм без загрязнений предварительно прокаленная при температуре 200–250 °С в течение 2–2,5 часов для удаления водорода при питании от источников с комбинированной внешней характеристикой низкими динамическими свойствами, улучшенным началом сварки и программой, обеспечивающей заварку кратера шва. Рекомендуют также применение порошковых проволок при защите дуги CO<sub>2</sub> или выполнение сварки в смеси аргона с углекислым газом (18–25 %).

При сварке в CO<sub>2</sub> с увеличением тока более 350 А наблюдается значительное погружение дуги в жидкую ванну и уменьшение разбрызгивания. Однако швы формируются с глубоким проваром, большим

усилением и малой шириной. Такие режимы могут быть использованы при сварке в нижнем положении коротких швов на толстом металле (более 16 мм), например, при сварке строительной арматуры, без разделки кромок и принудительным формировании стыков, а также при сварке вертикальных швов с принудительным формированием и добавкой небольшого количества флюса.

### 2.3. Сварка в смесях газов

Используемые смеси содержат 20–30 % кислорода. Процесс в основном отличается более высоким окислительным потенциалом защитной среды и более высокой температурой металла сварочной ванны. Для сварки используют проволоки с более высоким содержанием раскислителей. При малой длине дуги на низких напряжениях процесс протекает с короткими замыканиями. При высоких напряжениях процесс протекает без коротких замыканий и сопровождается повышенным разбрызгиванием за счет взрыва шеек между электродом и каплей и выброса капель. Применяется сварка в смеси углекислого газа с кислородом при сварке в нижнем положении на повышенных токах. Формирование шва лучше, чем при сварке в чистом углекислом газе, но поверхность покрыта большим количеством шлака.

*Сварка в смесях аргона с кислородом, аргона с углекислым газом и аргона с углекислым газом и кислородом.* При сварке углеродистых сталей в чистом аргоне в швах образуются поры, поэтому применяются смеси аргона с кислородом или с углекислым газом.

При добавлении к аргону кислорода могут быть получены процесс с крупнокапельным переносом, струйный и импульсно-дуговой.

При добавлении к аргону углекислого газа уменьшаются размеры дуги и увеличивается давление дуги на ванну и каплю на электроде. Изменения зависят от содержания углекислого газа. При содержании в смеси до 15%  $\text{CO}_2$  получают такие же процессы, что и в чистом аргоне: крупнокапельный, импульсно-дуговой и струйный (при силе тока выше критического). При содержании в смесях аргона с (20–25% и более) углекислого газа и в тройных смесях: аргона с 20% углекислого газа и 5% кислорода получают процесс с частыми принудительными короткими замыканиями (при использовании проволок диаметром 0,5–1,2 мм), крупнокапельный и струйный. Процесс с частыми короткими замыканиями подобен сварке в  $\text{CO}_2$ , но отличается более длиной и мягкой дугой, меньшей глубиной провара, меньшим разбрызгиванием, но большей чувствительностью к магнитному дутью. Это затрудняет провар

корня шва при узких разделках. Токи струйного процесса выше, чем в чистом аргоне.

При сварке в смесях аргона с  $\text{CO}_2$  (до 25%) давление дуги меньше, чем в  $\text{CO}_2$ , соответственно, меньше отгеснение капель от ванны и выброс капель за пределы ванны. При сварке на токах струйного переноса расплавленный конец электрода вытянут в виде конуса, с которого отрываются мелкие капли и попадают в сварочную ванну на изделия. Потери электродного металла происходят, в основном, за счет испарения и взрыва перемычек между каплями и расплавленным электродом. Разбрызгивание при сварке в смесях аргона с  $\text{CO}_2$  (до 25%) углеродистых сталей на токах струйного процесса наблюдается только при использовании электродных проволок с недостаточным содержанием кремния и марганца, покрытых смазками и ржавчиной, нарушениях защиты газом и сварке грязного, ржавого металла. Разбрызгивание происходит за счет взрыва перемычек между каплями и расплавленным электродом. При сварке на повышенных токах длина расплавленной части электрода увеличивается и под действием собственного магнитного поля изгибается и капли выбрасываются за пределы шва.

Из-за большей длины дуги в смесях аргона с углекислым газом для обеспечения надежной защиты необходимо увеличивать расход смеси газов. Помимо этого увеличенное излучение дуги требует усиления защиты глаз и открытых частей тела сварщика отраженными от стен лучами. Наиболее перспективными областями применения смесей являются автоматическая сварка.

Таблица 2.3

*Диапазоны сварочных токов при сварке проволоками СВ-08Г2С  
(обратная полярность)*

Состав газа	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А			
		с короткими замыканиями	импульсно-дуговой	с крупнопельным переносом	струйный
А+ $\text{CO}_2$ 8–18%	1,0	–	20–150	30–180	180–250
	1,2	–	30–200	40–210	210–300
	1,4	–	40–220	50–230	230–350
	1,6	–	50–250	60–250	280–400
	2,0	–	50–280	70–280	280–480
А+ $\text{CO}_2$ 20–25%	1,0	40–110	20–180	100–200	200–350
	1,2	50–170	30–230	110–220	220–370
	1,4	70–200	40–250	120–240	240–420
	1,6		50–280	150–280	280–480
	2,0		60–300	180–300	300–550

При сварке проволоками диаметром до 4 мм стабильность процесса высокая при использовании головок с постоянной скоростью подачи электрода. При увеличении диаметра электрода более 4 мм рекомендуют сварку выполнять головками с зависимой от напряжения скоростью подачи проволоки и питанием от источников тока с крутопадающей внешней характеристикой и с пониженными скоростями изменения  $I_{к.з.}$ .

*Импульсно-дуговой процесс* получают непрерывным горением дуги с принудительными короткими замыканиями и принудительным гашением дуги путем наложения импульсов тока. Наибольшее распространение получила импульсно-дуговая сварка с непрерывным горением дуги при жесткой программе наложения импульсов тока (рис. 1.12). Основные характеристики этого процесса: среднее напряжение процесса сварки  $U_{св}$ ; средняя сила тока процесса сварки  $I_{св}$ . Дополнительные максимальное напряжение импульса  $U_{и}$  напряжение в промежутке (паузе) между импульсами  $U_{п}$  максимальное значение тока в импульсе  $I_{и}$ ; ток в промежутке (паузе) между импульсами  $I_{п}$ ; длительность импульса тока  $\tau_{и}$ ; длительность паузы между импульсами  $\tau_{п}$ ; длительность цикла  $T = \tau_{и} + \tau_{п}$ ; частота следования импульсов  $f_{и} = 1/T$ . Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом осуществляется обычно при постоянной скорости подачи электродной проволоки. Особенности импульсно-дуговой сварки в  $Ar + CO_2$  (до 15%) и  $Ar + CO_2$  (до 15%) +  $O_2$  с непрерывным горением дуги являются: стабильное течение процесса сварки на малых токах в 2–2,5 раза меньше критического; возможность выполнения сварки во всех пространственных положениях проволокой диаметром до 2,5 мм; малое разбрызгивание и хорошее формирование шва. Малая чувствительность к влиянию магнитного дутья, меньшее окисление элементов из проволоки, улучшение микроструктуры шва и зоны термического влияния. Исходя из этого определены следующие основные области применения импульсно-дуговой сварки в  $Ar + CO_2$  (до 15%) и  $Ar + CO_2$  (до 15%) +  $O_2$  это сварка металла малых и средних толщин (1–12 мм) во всех пространственных положениях; сварка металла средних и больших толщин в вертикальном и потолочном положениях; односторонняя сварка стыковых соединений с полным проваром корня шва; сварка корневых швов; сварка термоупрочненных металлов во всех пространственных положениях при необходимости минимального проплавления и разогрева изделия и измельчения структуры шва.

## 2.4. Сварка порошковыми (газозащитными) проволоками в CO<sub>2</sub>

Характер процесса зависит от состава электродной проволоки. При сварке в CO<sub>2</sub> порошковыми проволоками карбонатного типа процесс протекает с крупнокапельным переносом, во многом подобный сварке с CO<sub>2</sub> проволоками типа Св-08Г2С. При использовании порошковых проволок рутилового типа процесс протекает с мелкокапельным переносом. Механические свойства зависят от марки порошковой проволоки. При питании от источников тока с плогопадающей внешней характеристикой с высокими и средними скоростями нарастания тока короткого замыкания начало сварки и формирование швов хорошее, разбрызгивание небольшое.

Основная область применения сварки порошковыми рутиловыми проволоками диаметром 2–3,2 мм – сварка швов в нижнем и горизонтальном положении. Сварка порошковыми (газозащитными) проволоками диаметром 1,6 мм применяется при выполнении швов в нижнем и вертикальном положении снизу вверх. Проволоки диаметром 1,2–1,4 мм – используют при сварке углеродистых и низколегированных сталей средних толщин с большим количеством коротких, замкнутых (кольцевых) швов, расположенных в различных пространственных положениях.

Таблица 2.4

*Диапазоны режимов сварки порошковыми проволоками рутилового типа ПП АН-38, ПП АН-58, Megafil 710 и Megafil 713 в CO<sub>2</sub>*

Диаметр проволоки, мм	Ток сварки, А	Напряжение сварки, В	Производительность, кг/ч
1,2	150–300	23–30	3–3,5
1,6	180–350	25–31	3–4,5
2,0	250–400	26–32	4–6

Проволоки марок типа ПП АН, ППс-ТМВ7 изготавливают из ленты путем ее сворачивания по обычной технологии (изготовитель ООО «ТМ Велтек»). Проволоки типа Megafil изготавливают из калиброванной цельной трубы с флюсовым сердечником путем ее опрессовки и волочения по технологии и на оборудовании фирмы Drahtzug Stien wire and welding на ООО «АРКСЭЛ» в г. Донецке. Проволоки поставляют на стандартных катушках диаметром 200 и 315 мм согласно ГОСТ 26271-84.

## 2.5. Влияние различных факторов на стабильность процесса сварки и разбрызгивание электродного металла

Стабильность процесса сварки и разбрызгивание электродного металла в основном определяются [29]:

- технологическими факторами;
- пространственным положением сварки;
- динамическими свойствами источников питания.

Первая группа причин связана с применением повышенных режимов, которые увеличивают интенсивность металлургических реакций в капле и ванне. Так, например, с повышением дугового напряжения увеличивается длина дуги, длительность периодов горения дуги и диаметр капель. Форма шва с повышением дугового напряжения несколько улучшается, но увеличивается окисление элементов и разбрызгивание. При повышенных дуговых напряжениях процесс переходит в неуправляемый крупнокапельный. Потери на окисление и разбрызгивание резко увеличиваются. Кроме того, на стабильность процесса и разбрызгивание электродного металла большое влияние оказывает состояние сварочных материалов и их химический состав. Применение для сварки ржавой или загрязненной проволоки, кипящих или покрытых окалиной сталей, также ухудшает протекание процесса, нарушает его стабильность и увеличивает разбрызгивание электродного металла [30–34].

Для того, чтобы перечисленные факторы не ухудшали процесс сварки и не увеличивали разбрызгивание электродного металла, необходимо вести процесс на нормальных режимах ( при плотностях тока  $j \leq 100 \text{ А/мм}^2$ ), применять для сварки чистую проволоку, соответствующую ГОСТ 2246-71. Для защиты проволоки от ржавчины рекомендуют применять специальные антикоррозийные покрытия. Кроме того, имеются рекомендации по введению в сварочную проволоку антикоррозионных добавок, а также использованию в качестве защитной среды смеси газов [30–43].

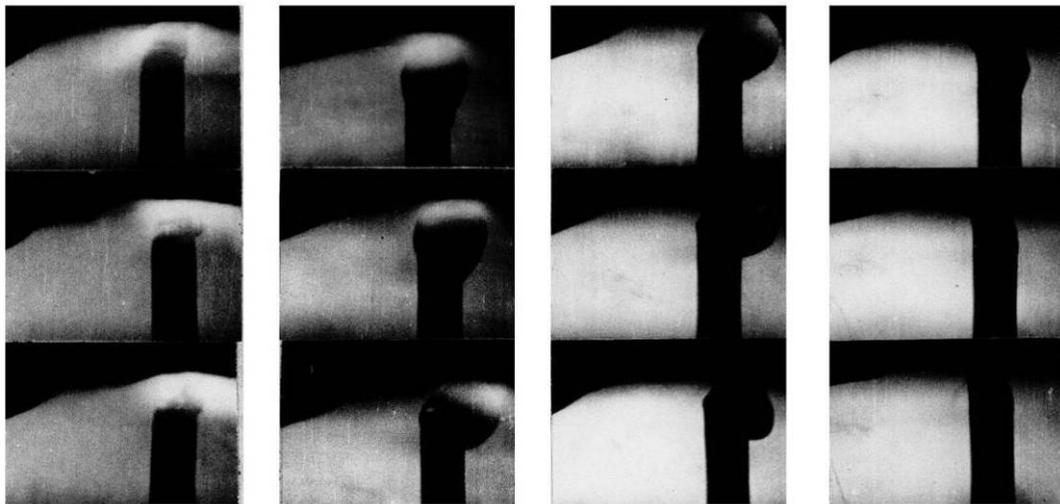
Эта группа причин оказывает косвенное действие на стабильное протекание процесса и обуславливается нарушением нормальных условий переноса электродного металла (размера капель, частоты коротких замыканий и длительности горения дуги), а также условий горения дуги. От перечисленных факторов зависит действие основных факторов, приводящих к ухудшению процесса (увеличение неустойчивости, увеличение энергии взрыва и газодинамического удара, изменение частоты коротких замыканий и др.).

Группа причин, связанная с положением сварки, в основном определяется комплексом сил, действующих на каплю расплавленного металла при её переносе в сварочную ванну.

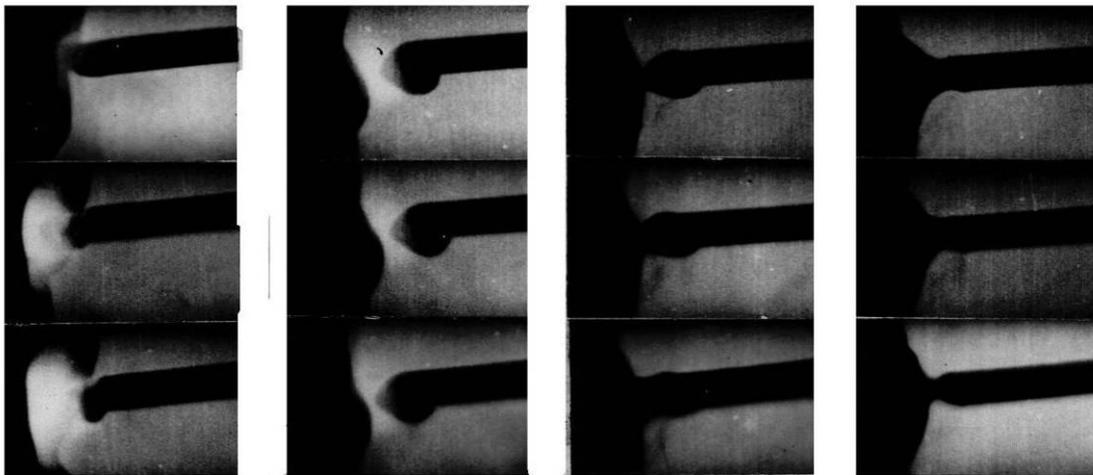
Анализ действия комплекса сил показывает, что при сварке в среде  $\text{CO}_2$  почти все силы (кроме силы тяжести в нижнем положении и силы газодинамического воздействия) препятствуют переносу электродного металла в сварочную ванну. Это способствует вытеснению расплавленного электродного металла на боковую поверхность, что в свою очередь способствует усилению нестабильности процесса и увеличению разбрызгивания. Пространственное положение сварочной ванны, отличное от нижнего, ещё более усиливает действие перечисленных факторов.

Изучению поведения сварочной ванны и расплавленного электродного металла в положениях, отличных от нижнего, посвящено достаточно большое количество работ [44–46 и др.]. Анализ этих работ и кинограмм процесса сварки (рис. 2.3) позволяет представить механизм коротких замыканий в положениях отличных от нижнего следующим образом.

В начальный период образования капля находится на торце электрода под действием силы поверхностного натяжения. При этом размер капли незначительно превышает диаметр проволоки. При дальнейшем увеличении объема капли сила тяжести преобладает над силой поверхностного натяжения и капля электродного металла начинает стекать с торца на боковую поверхность электрода как в потолочном так и в вертикальном положениях. При этом размер капель по сравнению со сваркой в нижнем положении увеличен. Кроме перечисленных сил на размер капли оказывает влияние реактивное давление паров, которое способствует стеканию жидкой капли на боковую поверхность, следует отметить также большую, чем в нижнем положении, подвижность сварочной ванны, которая наплывая (рис. 2.3, а), либо отвисая (рис. 2.3, б), способствует ускорению образования короткого замыкания. Перенос капли в ванну происходит в основном под действием силы поверхностного натяжения и электромагнитной силы, которая ускоряет образование и разрыв шейки электродного металла. При этом подвижность капля жидкого металла в положениях, отличных от нижнего вследствие расположения их на боковой поверхности несколько меньше, чем при сварке в нижнем положении. При увеличенном размере капель они часто не достигают сварочной ванны, падают вниз на кончик, увеличивают потери металла на разбрызгивание, понижают стабильность процесса сварки и часто нарушают нормальное его протекание.



а)



б)

*Рис. 2.3. Кинокадры процесса сварки в  $CO_2$  : а) в вертикальном положении; б) в потолочном положении*

Основная причина, влияющая на указанные недостатки процесса сварки в среде  $CO_2$ , связана с динамическими свойствами источника питания и определяется программой изменения мгновенной мощности как на интервале горения дуги, так и на интервале короткого замыкания [19, 29, 43, 47]. В процессе сварки длительность горения дуги сильно зависит от величины сварочного тока и энергии, запасенной в индуктивном сопротивлении сварочного дросселя на интервале короткого замыкания. Указанные параметры режима сварки определяют комплекс сил, действующих на каплю электродного металла и сварочную ванну, которые, как было показано выше, препятствуют её переносу во всех пространст-

венных положениях. Все это определяет размеры капли электродного металла, момент короткого замыкания и его длительность, а, следовательно, и энергию, запасенную в дросселе и выделяемую на дуговом промежутке после повторного возбуждения дуги.

Поскольку длительности горения дуги не постоянны, то не постоянными будут и длительности коротких замыканий, поэтому в сварочном дросселе будет запасаться разное количество энергии, идущей затем на плавление электродного металла. Все это предопределяет вероятностный характер коротких замыканий, который приводит к нестабильности процесса сварки и увеличению разбрызгивания электродного металла.

При ведении процесса сварки в положениях, отличных от нижнего, факторы, влияющие на основные его недостатки ещё более усиливаются, т.к. при этом повышается роль движения металла сварочной ванны в механизме коротких замыканий, что предопределяет ещё большую нестабильность процесса и увеличивает разбрызгивание электродного металла.

В связи с отмеченным, устранение основных недостатков процесса сварки короткой дугой возможно только за счёт перераспределения комплекса сил, действующих на каплю электродного металла и сварочную ванну таким образом, чтобы обеспечивались идентичные условия для её расплавления и переноса. Такое ведение процесса можно обеспечить при использовании специальных систем управления процессом сварки совместно с источниками питания, имеющих необходимые динамические свойства [48].

## ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В CO<sub>2</sub> КОРОТКОЙ ДУГОЙ

### 3.1. Способы стабилизации и уменьшения разбрызгивания электродного металла процесса сварки короткой дугой

Работы, направленные на устранение недостатков процесса сварки в среде CO<sub>2</sub> имеют два основных направления:

1. Повышение стабильности процесса сварки;
2. Уменьшение разбрызгивания электродного металла.

Первое направление решает задачу поддержания неизменных во времени электрических и тепловых характеристик процесса сварки, изменение их по определенной программе.

Известны методы дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка [49, 50]. В первом методе [49] поддерживается максимальная частота коротких замыканий, при этом авторы данной работы считают, что процесс в этом случае протекает наиболее стабильно с минимальным разбрызгиванием электродного металла. Во втором методе производят поддержание среднего дугового напряжения [51], либо отношение среднего рабочего напряжения к среднему дуговому напряжению в определенных пределах [50]:

$$U_{\text{д}} > U_{\text{хх}}/2 \quad (3.1)$$

$$t_{\text{д}}/t_{\text{ц}} = U_{\text{р}}/U_{\text{д}} = 0,6 - 0,7 \quad (3.2)$$

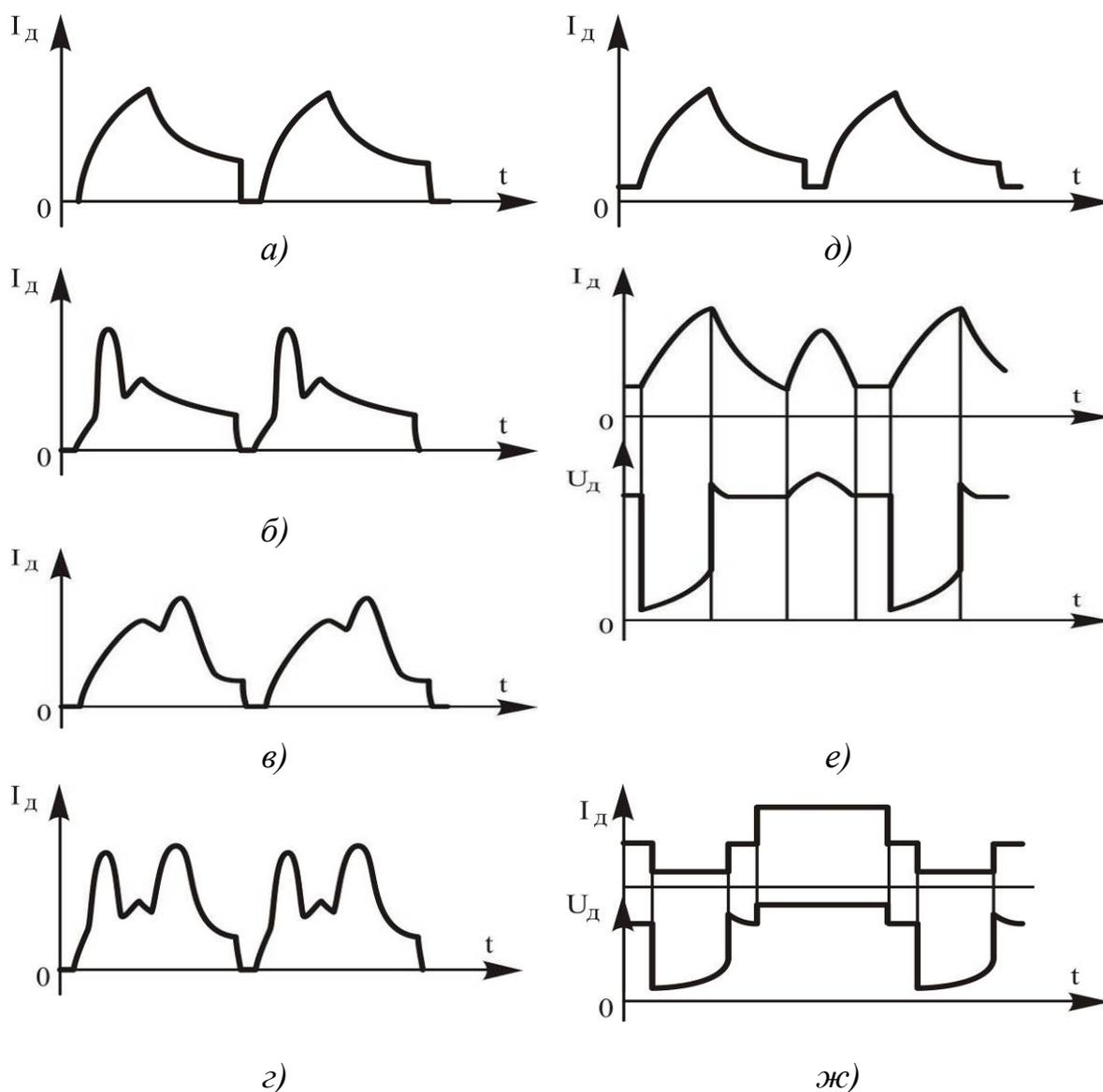
где  $U_{\text{д}}$  – среднее напряжение на дуге;  $U_{\text{хх}}$  – напряжение холостого хода источника;  $t_{\text{д}}$  – длительность дугового разряда;  $t_{\text{ц}}$  – длительность цикла изменения тока и напряжения процесса сварки;  $U_{\text{р}}$  – среднее рабочее напряжение;  $U_{\text{д}}$  – среднее дуговое напряжение.

Авторы второго метода также считают, что процесс сварки протекает устойчиво с небольшими отклонениями и минимальным разбрызгиванием в пределах (4...6 %).

Данные методы сварки характеризуются тем, что для их реализации необходимы минимально возможное среднее напряжение на дуге и повышенное значение индуктивности сварочной цепи. Однако, как было отмечено выше, малые дуговые напряжения вызывают неудовлетворительное формирование сварочного шва. Кроме того, такой процесс не эффективен при мгновенных возмущениях в пределах одного микроцикла, что не позволяет устранить его основные недостатки.

Известны способы сварки, в которых производится дозирование энергии, идущей на плавление электродного металла [52–56]. В данных способах после расплавления определенного количества электродного металла обеспечивают принудительное короткое замыкание либо за

счёт наложения на дугу постоянной полярности импульсов напряжения и тока противоположной полярности (рис. 3.1, а-г), либо за счёт периодического снижения напряжения с заданной частотой (рис. 3.1, д).



*Рис. 3.1. Эпюры тока и напряжения известных способов стабилизации процесса сварки в среде  $CO_2$  короткой дугой*

Данные способы сварки позволяют стабилизировать процесс, а также позволяют регулировать процессом каплеобразования и переноса электродного металла в сварочную ванну. Однако, при их реализации не удается полностью устранить основные недостатки процесса сварки, так как расплавление и перенос электродного металла не осуществляется при строго повторяющихся микроциклах, что является неперменным

условием стабильности [19]. В способах сварки [52–54] во время дозирования энергии плавления входит время короткого замыкания, величина которого зависит от количества переносимого электродного металла и динамических свойств источников питания. Поэтому длительность горения дуги при этом в пределах каждого микроцикла не будет величиной постоянной. Такое определение длительности дозирования не позволяет получить процесс сварки с минимальными отклонениями его параметров. В способах сварки [55, 56] пауза протекания сварочного тока перед коротким замыканием задается параметрически без учета состояния дугового промежутка. Поэтому начало действия паузы может совпасть с началом короткого замыкания, что приводит к затягиванию длительности короткого замыкания и нарушению устойчивости процесса. Кроме того, во всех перечисленных способах сварки разрушение перемычки происходит при пиковом значении тока короткого замыкания, что вызывает повышенное разбрызгивание электродного металла.

Известны способы сварки [26, 57], в которых дозирование энергии плавления осуществляется за счёт наложения на дугу мощных импульсов (рис. 3.1, е, ж). Во время действия импульсов происходит расплавление определенного количества электродного металла и затем последующий его переход во время короткого замыкания, на интервале которого осуществляют ограничение величины тока.

Однако при таких способах сварки будет иметь место затягивание длительности короткого замыкания, что может привести к нарушению устойчивости процесса. Кроме того, в способе сварки [26] увеличение тока до величины импульса осуществляется с определенной регулируемой задержкой относительно начала короткого замыкания, т.е. параметрически, что не учитывает состояние дугового промежутка. Следовательно, начало действия импульса может наступить на интервале короткого замыкания, что приведет к увеличению разбрызгивания электродного металла в момент повторного возбуждения дуги.

Общей чертой второго направления устранения основных недостатков процесса сварки в среде  $\text{CO}_2$  короткой дугой, связанного с уменьшением разбрызгивания электродного металла, является ограничение тока короткого замыкания в отдельных его фазах и при повторном возбуждении дуги.

При анализе данного направления следует отметить, что имеется две гипотезы о причинах разбрызгивания электродного металла. С одной стороны отмечается, что сварочная ванна в момент повторного возбуждения дуги испытывает сильный удар [58]. Этой же гипотезы придерживаются и авторы других более поздних работ [46, 59–61]. При этом, как показано авторами работы [61], ещё не разрушившаяся пере-

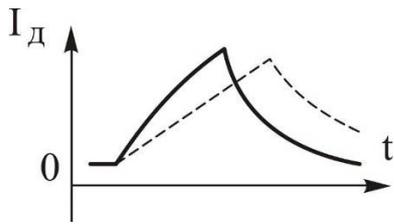
мычка шунтируется дугой, и разбрызгивание электродного металла происходит за счёт силового действия дуги в момент её повторного возбуждения [62].

С другой стороны, причиной разбрызгивания является взрыв перемычек [63], вызываемый прохождением по ним тока и нагревом джоулевым теплом, в момент действия, которых перемычка перегревается с последующим взрывообразным испарением. По времени взрыв предшествует последующему силовому действию дуги.

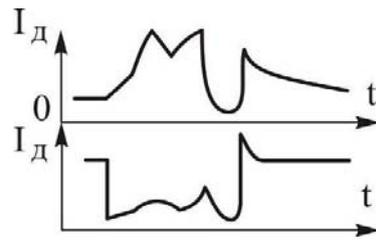
В настоящее время известно большое количество способов ограничения пикового значения тока короткого замыкания, при котором происходит разрушение перемычки. В основном эти способы реализуют либо за счет включения дросселя или активного сопротивления в сварочную цепь, либо за счет электронных ключей, позволяющих формировать определенную программу изменения тока короткого замыкания. При включении дросселя в сварочную цепь ток короткого замыкания  $I_{кз}$  нарастает к своему пиковому значению по экспоненте (рис. 3.2, а). Увеличение индуктивного сопротивления дросселя приводит к уменьшению пикового значения  $I_{кз}$  и частоты коротких замыканий. При этом разбрызгивание электродного металла уменьшается.

При включении резистора в сварочную цепь, ток короткого замыкания  $I_{кз}$  достигает своего пикового и установившегося значения в первый момент и остается неизменным до его окончания (рис. 3.2, д). В момент окончания короткого замыкания ток быстро снижается до величины тока горения. Такое быстрое снижение тока способствует уменьшению газодинамического удара на сварочную ванну и благоприятно сказывается на уменьшении разбрызгивания электродного металла [31]. По оценке автора этой работы Зарубы И.И. оба способа ограничения пикового значения тока короткого замыкания равноценны, т.к. каждый из них имеет предпочтительные области применения.

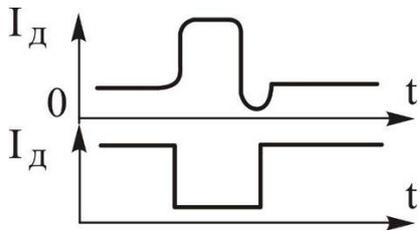
Известны способы сварки [64–69], в которых производят уменьшение сварочного тока к моменту разрыва перемычки. В первом случае [64] (рис. 3.2, б) пауза в протекании сварочного тока задается с определенным запаздыванием относительно начала короткого замыкания, во втором [65–69] (рис. 3.2, в, г, з) начало паузы в протекании сварочного тока совмещается с достижением перемычкой критических размеров (процесс её разрушения необратим). Во всех рассмотренных способах сварки разрушение перемычки происходит при небольшой величине тока паузы, что обеспечивает уменьшение разбрызгивания электродного металла в момент повторного возбуждения дуги.



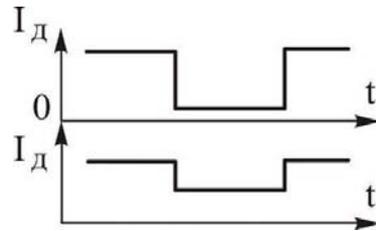
a)



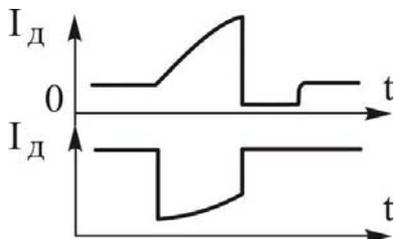
3)



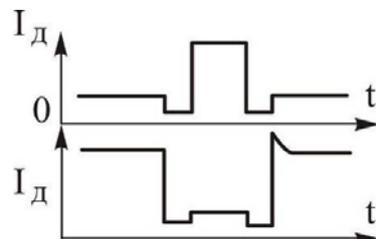
б)



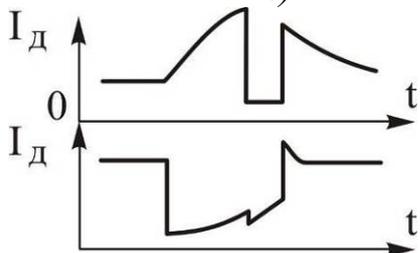
и)



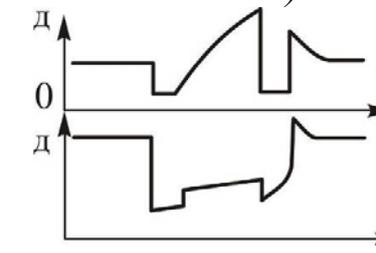
в)



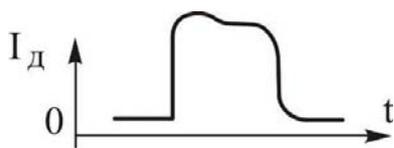
к)



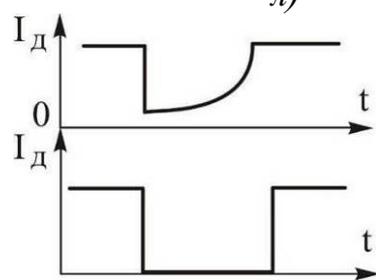
г)



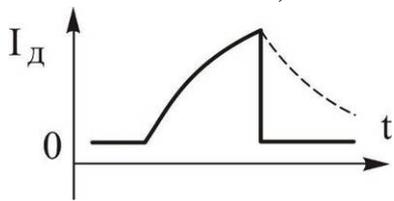
л)



д)

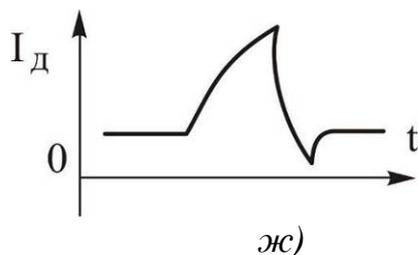


м)



е)

Рис. 3.2. Продолжение рис. на стр.75



*Рис. 3.2. Циклограммы тока и напряжения известных способов сварки в среде  $CO_2$  короткой дугой, созданных для уменьшения разбрызгивания электродного металла*

В процессе сварки наряду с разбрызгиванием в момент повторного возбуждения дуги имеет место разбрызгивание в начальной стадии короткого замыкания за счет большой скорости нарастания тока короткого замыкания и пространственного положения капли электродного металла и сварочной ванны перед коротким замыканием [19, 45].

Для устранения указанного недостатка авторами работ [19, 70, 71] были предложены способы сварки (рис. 3.2, и, к, л), в которых производят уменьшение тока короткого замыкания по его началу, что обеспечивает благоприятные условия развития контакта капли и сварочной ванны. Для устранения влияния непрерывной подачи электродной проволоки производят выключение её подачи в момент начала короткого замыкания и включение по его окончанию (рис. 3.2, м) [72]. Такое техническое решение позволяет повысить стабильность процесса сварки и несколько снизить разбрызгивание.

Для реализаций второй гипотезы об устранении влияния силового действия дуги на сварочную ванну были предложены способы сварки, в которых осуществляется гашение энергии, запасенной в дросселе на интервале короткого замыкания (рис. 3.2, ж, е) [46, 73]. Происходит ограничение газодинамического удара, что способствует уменьшению разбрызгивания.

Анализ рассмотренных способов сварки с учётом достоинств и недостатков каждого из них показывает, что все они решают только часть проблемы устранения основных недостатков процесса сварки, т.е. направлены либо на повышение стабильности, либо на уменьшение разбрызгивания электродного металла. Они ограничены по своим возможностям и не обеспечивают стабильного протекания процесса на всей длительности периода каплеобразования и переноса электродного металла, что возможно только при обеспечении неизменных во времени его электрических и тепловых характеристик, либо изменяющихся по определенной программе.

### **3.2. Устройства токоограничения и стабилизации процесса сварки короткой дугой**

Усилия, направленные на разработку устройств стабилизации процесса сварки короткой дугой, в основном сосредоточены на двух направлениях:

1. Разработка новых типов токоограничивающих устройств.
2. Разработка устройств автоматической стабилизации режима сварки по его мгновенным показателям.

Первое направление решает задачу устранения основных недостатков при естественном протекании сварки и в основном позволяет оптимизировать интервал короткого замыкания по минимуму разбрызгивания электродного металла.

Второе направление решает задачу устранения основных недостатков на всей длительности каплеобразования и переноса электродного металла и связано с регулированием мгновенных показателей процесса сварки.

#### **Токоограничивающие устройства.**

При создании систем с оптимальными динамическими свойствами большое значение имеет правильный выбор токоограничивающих устройств, которые обеспечивают определенную программу изменения мгновенной мощности, как на интервале короткого замыкания, так и в момент повторного возбуждения дуги. В основном токоограничивающие устройства выбирают не из условия максимально допустимой скорости нарастания тока короткого замыкания, а из условия необходимости ограничения его пикового значения. Это следует из того, что при наиболее распространенных методах токоограничения: инерционном (включение дросселя в сварочную цепь) и безинерционном (включение активного сопротивления в сварочную цепь), разрушение перемычки происходит при максимальном токе, что вызывает разбрызгивание электродного металла. Кроме того, в производственных условиях часто бывает необходимо изменять индуктивное сопротивление сварочного дросселя, что осуществляется либо ступенчато: за счёт включения той или иной части секций обмотки в сварочную цепь, либо плавно, за счёт изменения воздушного зазора в магнитопроводе. При этом настройка необходимых параметров дросселя, как правило, производится до начала процесса сварки, что требует остановки технологического процесса.

Для удобства настройки на требуемый режим были созданы токоограничивающие устройства [74–80], в которых кроме силовых обмоток, имеются обмотки управления, позволяющие регулировать их маг-

нитное состояние (рис. 3.3, а, б, в), а, следовательно, и величину индуктивного сопротивления. При этом обеспечивается быстрое регулирование параметров дросселя, что особенно важно для настройки требуемых режимов сварки.

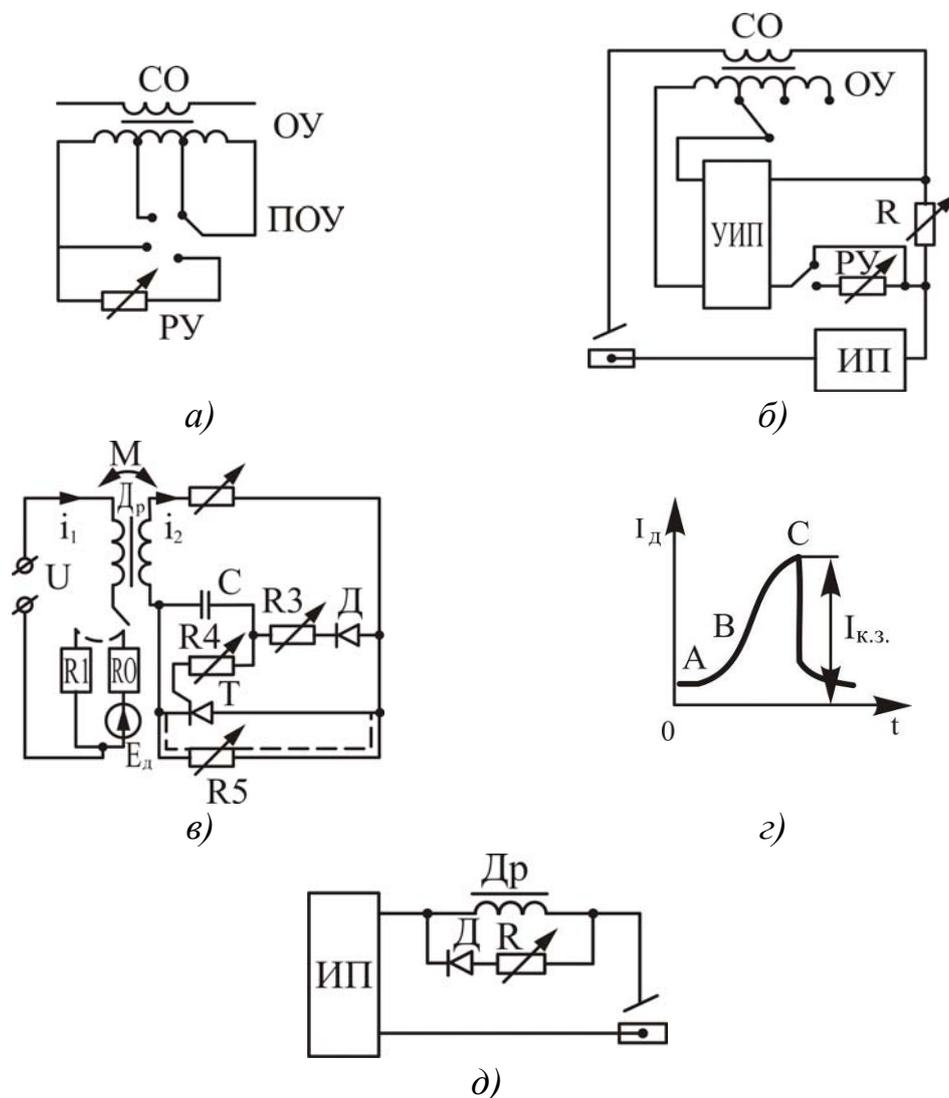


Рис. 3.3. Токоограничивающие устройства для создания оптимальной по разбрызгиванию формы тока короткого замыкания

Однако, наряду с отмеченным достоинством, токоограничивающие устройства [74–77] имеют также и недостаток, который заключается в том, что регулирование пикового значения тока короткого замыкания невозможно без изменения скорости его нарастания (рис. 3.3, а, б). Это приводит к затягиванию длительности короткого замыкания. Кроме того, амплитуда тока короткого замыкания в этих устройствах зависит от длительности короткого замыкания, которая является величиной

не постоянной. Это нарушает стабильность переноса электродного металла, ухудшает формирование сварочного шва и увеличивает разбрызгивание электродного металла.

Хорошие результаты с точки зрения формирования переднего и заднего фронтов тока короткого замыкания обеспечивает токоограничивающее устройство, представленное в работах [78, 79] (рис. 3.3, в, г). В процессе сварки по началу короткого замыкания скорость нарастания тока ограничена (участок А-В, рис. 3.3, г). По мере развития контакта капли с ванной скорость нарастания тока увеличивается (участок В-С). Это приводит к ускорению перехода электродного металла в сварочную ванну. В момент повторного возбуждения дуги ток резко падает до величины тока горения дуги, что способствует ограничению газодинамического удара.

К недостаткам данного устройства можно отнести его сложность, т.к. более просто того же эффекта можно достичь при использовании в качестве магнитной системы дросселя быстронасыщающегося сердечника [80]. Кроме того, большая амплитуда тока короткого замыкания способствует увеличению разбрызгивания из-за взрыва перемишки.

Для осуществления гашения энергии, запасенной в дросселе во время короткого замыкания, можно использовать устройство [73], в котором сварочный дроссель шунтируется диодом и резистором в обратном направлении сварочного тока (рис. 3.3, д). Недостатком данного токоограничивающего устройства является то, что на интервале горения дуги появляются большие пульсации тока и напряжения. Это ухудшает эластичность дуги и её устойчивость.

#### **Устройства импульсной стабилизации.**

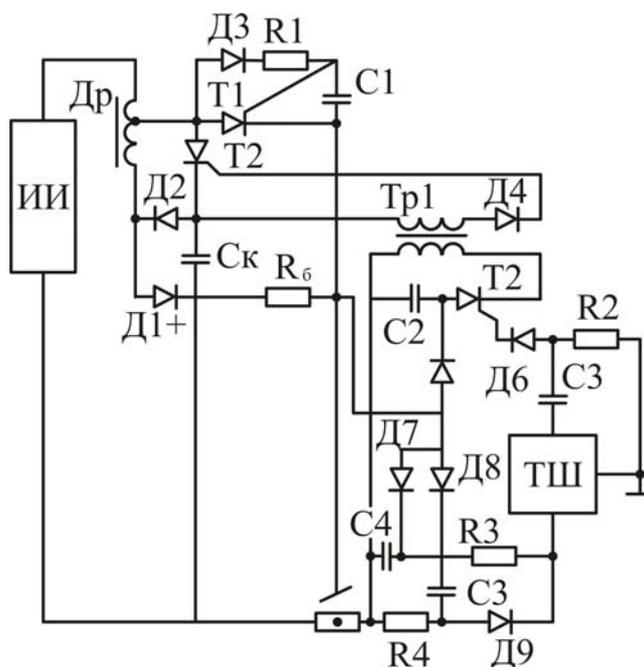
В настоящее время известно достаточно большое количество устройств, которые позволяют формировать желаемую, с точки зрения их авторов, программу изменения мгновенной мощности и обеспечивают активное управление процессом сварки на стадии микроцикла периода каплеобразования и переноса электродного металла. Данные устройства обеспечивают стабилизацию мгновенных показателей процесса за счёт дискретного (импульсного) их изменения во времени, поэтому условно будем их называть «импульсными стабилизаторами» (ИС).

В рамках данной работы невозможно рассмотреть и проанализировать все известные ИС, поэтому остановимся только на тех, которые обеспечивают на наш взгляд наиболее совершенные методы сварки, отметим их общие достоинства и недостатки, а также рассмотрим принципиальное построение отдельных наиболее важных узлов.

Почти все известные ИС содержат сварочный источник питания, электронный ключ (чаще всего тиристорный) для импульсного управ-

ления параметрами процесса сварки, дополнительный источник питания или секционированный резистор для обеспечения тока паузы и схему управления, которая состоит из комбинации широко известных в электронике узлов и блоков.

Например, на рисунке 3.4 представлено устройство [81], которое реализует способ сварки, рассмотренный в работе [69]. Данное устройство содержит сварочный источник питания ИИ, силовой тиристор  $T_1$  и вспомогательный тиристор, сглаживающий дроссель  $D_p$ , коммутирующий конденсатор  $C_k$ , балластное сопротивление  $R_6$ , блокирующие диоды  $D_1$  и  $D_2$ , а также схему управления, состоящую из дифференцирующей и интегрирующей цепей, порогового элемента ТШ (триггер Шмита) и импульсного усилителя.



*Рис. 3.4. Устройство для ступенчатого уменьшения сварочного тока в момент разрушения перемычки по А.с. № 551134*

Для надежного выключения силового тиристора необходимо иметь большие габариты конденсатора  $C_k$ . Пауза в протекании сварочного тока зависит в данном устройстве от параметров дросселя  $D_p$  и конденсатора  $C_k$ . Поскольку эти параметры могут быть значительными, то в данном устройстве весьма затруднительно будет получить минимально необходимую паузу с тем, чтобы вся энергия, запасенная в индуктивном сопротивлении сварочной цепи, расходовалась на плавление электродного металла. Кроме того, при реализации данным устройством

процесса сварки могут иметь место выбросы электродного металла из сварочной ванны в первой фазе короткого замыкания из-за большой скорости нарастания тока, которая ограничивается индуктивным сопротивлением только части секций сглаживающего дросселя  $D_p$ .

Исходя из анализа ИС, очевидно, что решение вопроса о наиболее полном устранении основных недостатков процесса сварки в среде  $CO_2$  короткой дугой, возможно только на основе формирования программы изменения мгновенной мощности дуги по её мгновенным показателям. Существующие ИС обеспечивают такое протекание процесса только на отдельных этапах микроцикла, что не позволяет им полностью устранить основные недостатки процесса сварки.

### **3.3. Разработка методов и устройств стабилизации процесса сварки короткой дугой**

**Выбор критериев стабилизации процесса сварки короткой дугой.** Проведенный анализ основных недостатков процесса сварки в среде  $CO_2$  короткой дугой позволяет сформулировать требования к циклограмме сварочного тока и напряжения, которые заключаются в следующем:

1. В первый момент короткого замыкания, когда площадь соприкосновения капли с ванной меньше сечения ее шейки и электродинамическая сила имеет отрицательный знак (направлена от сварочной ванны), необходимо ограничить скорость нарастания сварочного тока.

2. С момента, когда площадь соприкосновения капли и ванны становится больше сечения шейки, необходимо обеспечить резкое увеличение сварочного тока. При этом электродинамическая сила направлена от электрода к изделию и способствует переходу электродного металла в сварочную ванну.

3. При достижении перемычкой критических размеров (процесс ее разрушения необратим) необходимо кратковременно снизить ток до минимальной величины, достаточной для нормального возбуждения дуги. При этом разрушение перемычки должно происходить при минимальной величине тока в сварочной цепи.

4. С момента повторного возбуждения необходимо увеличить сварочный ток и дозировать энергию, идущую на плавление электродного металла. Это необходимо для создания идентичных условий для расплавления каждой капли электродного металла.

5. После окончания времени, предоставляемого для дозирования энергии, идущей на расплавление капли электродного металла, необходимо произвести уменьшение величины сварочного тока до минималь-

но возможной величины. Это приведет к резкому ограничению скорости плавления электрода, а также уменьшит силы отталкивания между каплей и ванной. При этом, вследствие непрерывной подачи электрода и встречного движения сварочной ванны, произойдет принудительное короткое замыкание, что обеспечит тем самым идентичные условия для переноса капли электродного металла в сварочную ванну.

Далее весь процесс повторяется и состоит из следующих один за другим, идентичных рассмотренному, микроциклов.

**Оптимизация формы тока короткого замыкания по минимуму разбрызгивания.** Большое значение для нормального протекания процесса сварки имеет форма тока короткого замыкания, которая определяется типом токоограничивающего устройства в сварочной цепи, правильно выбранное токоограничивающее устройство обеспечивает определенное изменение мгновенной мощности, как на интервале короткого замыкания, так и в момент повторного возбуждения дуги.

Проведенные исследования показали, что с точки зрения уменьшения разбрызгивания благоприятно сказывается ступенчатое уменьшение величины газодинамического удара на сварочную ванну в момент повторного возбуждения дуги. Это становится возможным благодаря применению токоограничивающих устройств (рис. 3.5) [73, 82, 83].

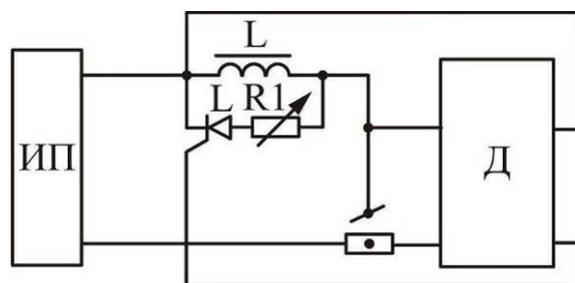


Рис. 3.5. Токоограничивающее устройство с шунтирующей цепью:  
*T* – тиристор; *R* – балластный реостат; *L* – сглаживающий дроссель;  
*ИП* – сварочный источник питания; *Д* – датчик окончания короткого замыкания

Анализ возможных режимов работы данных устройств показывает, что в момент разрыва перемычки в шунтирующей цепи скачкообразно появляется ток, который вызывает соответствующее уменьшение тока в основной цепи на величину, определяемую выражением

$$\Delta I = \frac{E}{R_y + R_1} \left( 1 - e^{-\frac{t_{к.з.}}{T}} \right), \quad (3.3)$$

где  $E$  – пассивная противо-э.д.с. сварочной дуги;  $R_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление сварочной цепи;  $R_l$  – величина сопротивления балластного реостата;  $t_{\text{кз}}$  – длительность короткого замыкания;  $T$  – постоянная времени сварочной цепи:

$$T = \frac{L}{R_{\Sigma}}; \quad (3.4)$$

$L$  – индуктивное сопротивление сварочного дросселя.

Из выражения (3.3) видно, что при величине активного сопротивления шунтирующей цепи  $R_l = 0$ , в основной цепи будет иметь место максимальный скачок тока от своего пикового значения до величины тока горения дуги. Осциллограммы тока и напряжения дуги с различными величинами значений сопротивления в шунтирующей цепи приведены на рис. 3.6. Экспериментальные и расчетные зависимости величины скачка тока от величины сопротивления в шунтирующей цепи в момент повторного возбуждения дуги приведены на рисунке 3.7.

Скачкообразное уменьшение тока в момент повторного возбуждения дуги, благодаря наличию шунтирующей цепи, снижает величину газодинамического удара, что почти полностью устраняет выплески металла из сварочной ванны.

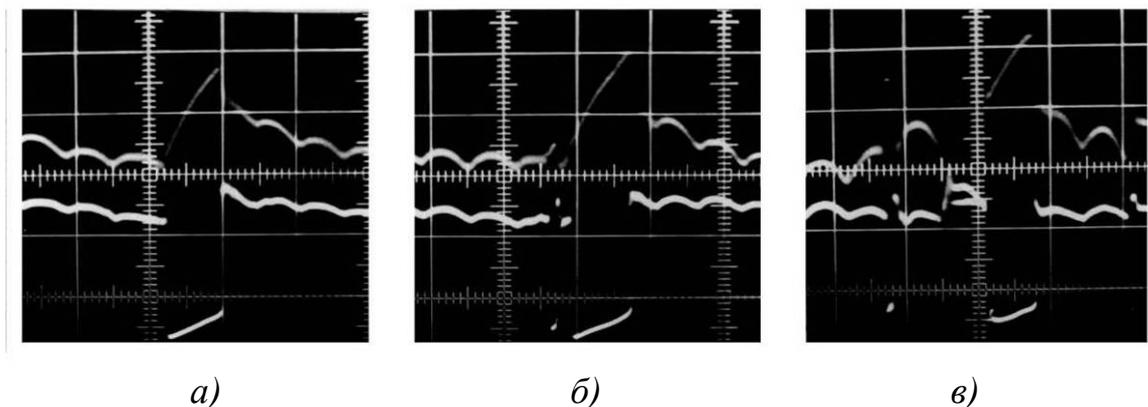


Рис. 3.6. Осциллограммы тока и напряжения дуги с различными величинами значений сопротивления  $R_l$  в шунтирующей цепи:  
 а)  $R_l = 0,1 \text{ Ом}$ ; б)  $R_l = 0,05 \text{ Ом}$ ; в)  $R_l = 0 \text{ Ом}$

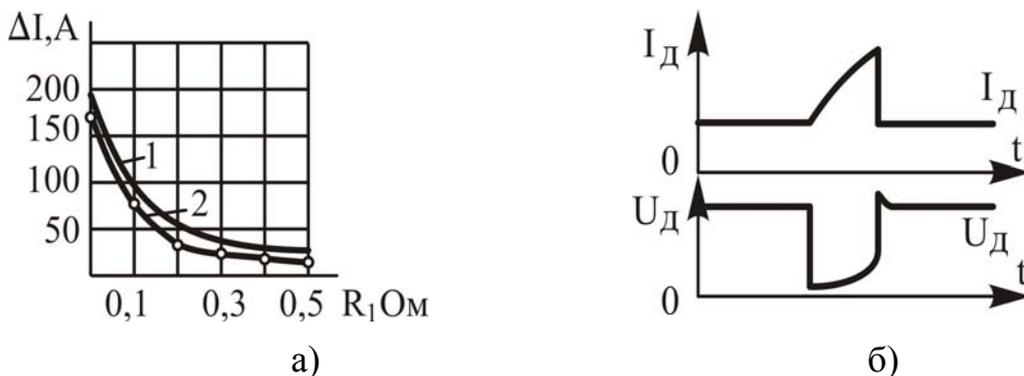


Рис. 3.7. а) Кривые изменения величины скачка тока в момент повторного возбуждения дуги: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная; б) Осциллограммы тока и напряжения дуги в момент повторного возбуждения дуги

На перенос металла и разбрызгивание электродного металла большое влияние оказывает форма переднего фронта тока короткого замыкания. При этом, как было показано выше, ограничение скорости нарастания тока короткого замыкания необходимо только в первой его фазе, когда электродинамическая сила имеет отрицательный знак и препятствует переходу электродного металла в сварочную ванну. После развития контакта капли и ванны, когда электродинамическая сила меняет знак и способствует переходу электродного металла в сварочную ванну, необходимо резкое увеличение скорости нарастания тока короткого замыкания. Такую форму тока короткого замыкания обеспечивает специальная конструкция самонасыщающегося дросселя [80, 82] сердечник которого выполнен разрезным и имеет воздушный зазор.

В зависимости от параметров сердечника дросселя, величины воздушного зазора, а также магнитных свойств материала, характеризующихся основной кривой намагничивания  $B=f(H)$ , изменяется величина индуктивного сопротивления дросселя. Поэтому при использовании дросселя с сердечником из быстронасыщающегося железа, любое изменение тока в сварочной цепи вызывает изменение величины индуктивного сопротивления дросселя, которая и определяет программу изменения тока короткого замыкания.

В общем виде значение индуктивного сопротивления дросселя определяется из следующего выражения [70]:

$$L = \frac{B \cdot \omega^2 S}{H \cdot l}, \quad (3.5)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля в сердечнике дросселя, Тл;  $\omega$  – число витков дросселя;  $S$  – сечение магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $H$  – напряженность

магнитного поля в сердечнике дросселя, А/м;  $l$  – средняя длина магнитных силовых линий дросселя, м.

В выражении (3.5) параметры  $\omega$ ,  $S$ , и  $l$  являются величинами постоянными, а  $B$  и  $H$  переменными, определяемыми основной кривой намагничивания. Наклон основной кривой намагничивания для заданного материала сердечника зависит от величины воздушного зазора, следовательно, скорость нарастания тока короткого замыкания можно получить, изменяя число витков и величину воздушного зазора дросселя (рис. 3.8).

Однако, при оптимизации тока короткого замыкания самонасыщающимся дросселем несколько увеличивается пиковое значение тока короткого замыкания, при котором происходит разрушение переключки. Это оказывает значительное влияние на разбрызгивание электродного металла в момент повторного возбуждения дуги.

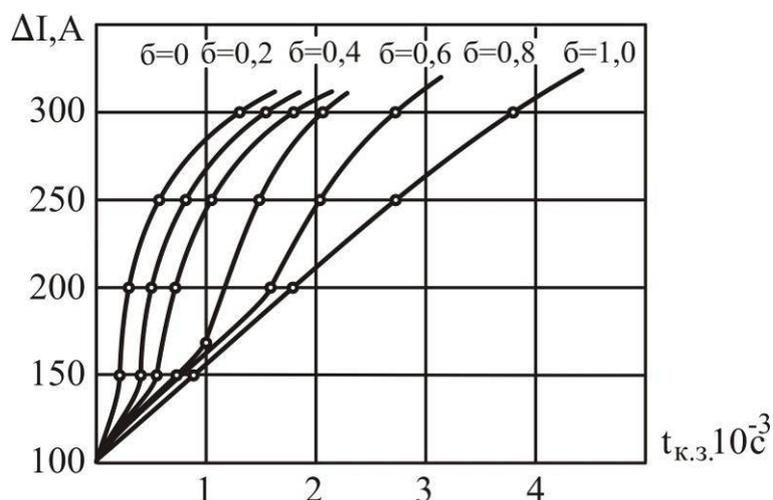
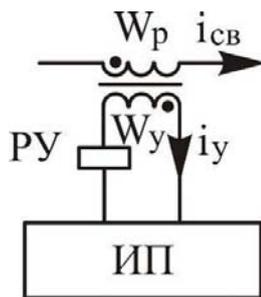
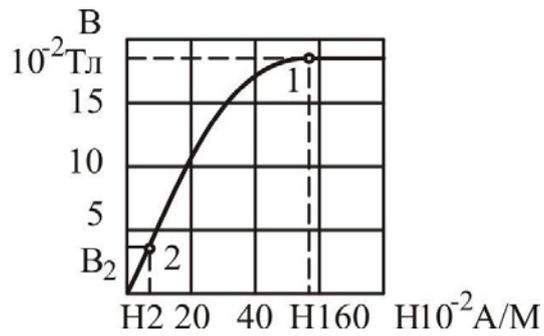


Рис. 3.8. Экспериментальные зависимости скорости роста тока короткого замыкания при включении в сварочную цепь самонасыщающегося дросселя ( $\delta$  – величина воздушного зазора, мм)

Для стабилизации амплитуды тока короткого замыкания разработан и исследован специальный стабилизирующий дроссель (рис. 3.9, а) [84], который ограничивает пиковое значение тока короткого замыкания на любом заданном уровне. Сердечник у стабилизирующего дросселя такой же, как и у самонасыщающегося.



а)



б)

Рис. 3.9. а) Схема стабилизирующего дросселя: ИП – источник питания обмотки управления, РУ – регулировочное устройство,  $W_p$  – силовая обмотка,  $W_y$  – обмотка управления; б) основная кривая намагничивания железа сердечника стабилизирующего дросселя

В процессе сварки через силовую обмотку  $W_p$  и обмотку управления  $W_y$  протекают токи  $i_{cв}$  и  $i_y$ , которые создают в этих обмотках встречные намагничивающие силы:

$$FW_y = i_y \cdot \omega_y; \quad (3.6)$$

$$FW_p = i_{cв} \cdot \omega_{co}. \quad (3.7)$$

При этом намагничивающая сила обмотки управления  $FW_y$  больше намагничивающей силы силовой обмотки  $FW_p$  на такую величину, которая обеспечивает насыщенное состояние магнитопровода. Это состояние характеризуется точкой 1 на основной кривой намагничивания сердечника дросселя (рис. 3.9, б). На интервале короткого замыкания происходит увеличение тока в силовой обмотке, которое вызывает соответствующее увеличение её намагничивающей силы, как только разность намагничивающих сил обмотки управления и силовой обмотки становится меньше намагничивающей силы насыщения магнитопровода, система выходит из насыщения. С этого момента скорость нарастания тока короткого замыкания резко уменьшается, и разрыв перемычки происходит при ограниченной его величине (рис. 3.9, б, точка 2).

Недостатком данного дросселя является то, что на интервале горения дуги, когда магнитная система дросселя находится в насыщенном состоянии, в сварочной цепи появляются пульсации тока и напряжения, что ухудшает эластичность дуги и увеличивает число её обрывов.

Указанные недостатки позволяет устранить конструкция стабилизирующего дросселя, в которой в часть витков силовой обмотки введен быстронасыщающийся сердечник, магнитно не связанный с основным магнитопроводом (рис. 3.10, а).

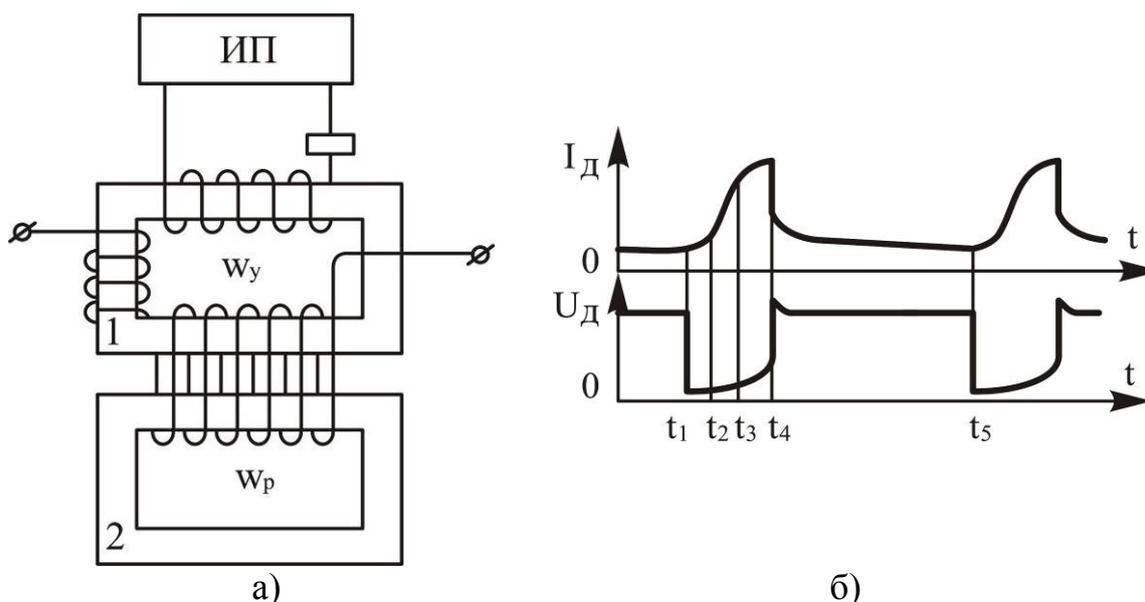


Рис. 3.10. Стабилизирующий дроссель с дополнительным магнитопроводом: а) схема; б) эпюры тока и напряжения

Принцип работы данного дросселя заключается в следующем: в процессе сварки через силовую и вспомогательную обмотки протекают токи, которые создают встречные намагничивающие силы. При этом на интервале горения дуги намагничивающая сила, создаваемая обмоткой управления  $W_y$  больше намагничивающей силы, создаваемой силовой обмоткой  $W_p$ , на такую величину, которая удерживает магнитопровод 1 в насыщенном состоянии, поэтому в первой фазе короткого замыкания в момент времени  $t_1$  (рис. 3.10, б) ток через силовую обмотку возрастает к своему амплитудному значению со скоростью, определяемой индуктивным сопротивлением части витков силовой обмотки  $W_p$ , в которую введен дополнительный быстронасыщающийся магнитопровод 2. При этом происходит благоприятное развитие контакта капли электродного металла и сварочной ванны, т.к. электродинамическая сила ограничена и не способствует выбросу электродного металла из сварочной ванны. По мере развития контакта капли с ванной электродинамическая сила меняет свое направление. Параметры дополнительного магнитопровода и число охватывающих его витков силовой обмотки выбираются такими, чтобы в этот момент он входил в насыщение. Магнитная проницаемость и индуктивность рассеяния при этом ничтожно малы, момент времени  $t_2$  (рис. 3.10, б). Поэтому на кривой тока в этот момент наблюдается характерный перегиб, который свидетельствует об увеличении скорости нарастания тока к своему максимальному значению. Резкое увеличение скорости нарастания тока короткого замыкания приводит к увеличению электродинамической силы, которая стремится сжать рас-

плавленную часть электродного металла по линии расплавления, что способствует сужению перемычки.

По мере увеличения тока через силовую обмотку  $W_p$  увеличивается создаваемая ею намагничивающая сила и в момент, когда разность намагничивающих сил обмотки управления и силовой обмотки становится меньше намагничивающей силы насыщения магнитопровода 1, система выходит из насыщения, момент времени  $t_3$  (рис. 3.10, б). При этом возрастают магнитная проницаемость и индуктивность рассеяния, что приводит к ограничению скорости нарастания тока короткого замыкания. Для регулирования амплитудного значения тока короткого замыкания в цепи питания обмотки управления имеется регулировочное устройство РУ. Это устройство позволяет изменять ток в обмотке управления, что способствует изменению начала выхода магнитопровода 1 из насыщения.

Разрушение перемычки происходит при ограниченной амплитуде тока короткого замыкания, момент времени  $t_4$  (рис. 3.10, б). С момента повторного возбуждения дуги ток резко уменьшает свою величину до момента выхода магнитной системы дополнительного магнитопровода 2 из насыщения. С этого момента ток плавно спадает до величины тока горения дуги и на интервале  $t_4-t_5$  (рис. 3.10, б) происходит устойчивое горение дуги с минимальным разбрызгиванием электродного металла [82].

Рассмотренные токоограничивающие устройства позволяют несколько снизить разбрызгивание электродного металла. Однако наряду с отмеченным достоинством все используемые токоограничивающие устройства имеют недостатки, которые заключаются в том, что они решают частные задачи, т.е. либо усиливают, либо ослабляют действие факторов, влияющих на процесс в отдельных фазах микроциклов. Это не всегда бывает оправданным на всей длительности микроциклов с точки зрения технологических требований. Так, ступенчатое уменьшение тока после разрыва перемычки приводит к появлению пульсаций и ухудшению эластичности дуги, ограничение скорости нарастания тока в первой фазе короткого замыкания самонасыщающимся дросселем приводит к неоправданному увеличению его пиковых значений в последней фазе и т.д. При этом многие токоограничивающие устройства имеют неудовлетворительные массогабаритные показатели и сложны в технической реализации. Кроме того, токоограничивающие устройства не меняют вероятностного характера коротких замыканий, т. к. начальные условия в первой фазе коротких замыканий различны, что обуславливается отсутствием дозирования энергии плавления и преимущественным

действием сил отталкивания капли электродного металла от сварочной ванны.

Более просто и эффективно оптимальная по разбрызгиванию форма короткого замыкания создается в системах импульсной стабилизации за счет рационального использования и усиления в нужном направлении коммутационных процессов, протекающих в силовой части.

### 3.4. Способы стабилизации процесса сварки короткой дугой

Наиболее эффективным, с точки зрения устранения основных недостатков, является процесс сварки, протекающий в зависимости от мгновенных значений параметров процесса. Такой процесс более устойчив как к постоянно действующим возмущениям на протяжении всего цикла сварки, так и к мгновенным возмущениям, действующим в пределах микроцикла.

Эпюры тока и напряжения процессов сварки [85–89], управляемых по мгновенным значениям параметров процесса и удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям представлены на рисунке 3.11.

Представленный процесс сварки, кроме общепринятых показателей, характеризуется дополнительными параметрами:

$T_{ц}$  – периодом повторения микроциклов;

$\tau_1$  – паузой в протекании сварочного тока к моменту разрыва перемычки;

$\tau_2$  – длительностью дозирования энергии плавления электрода;

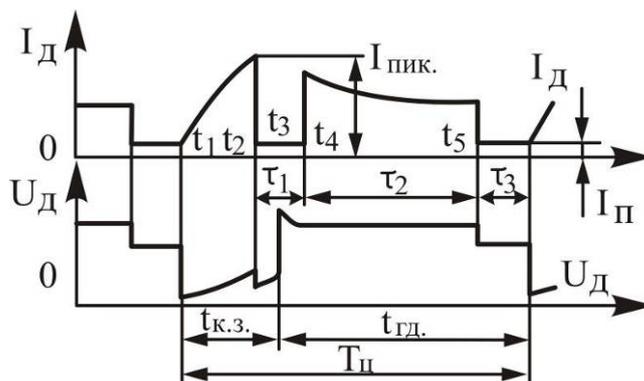
$\tau_3$  – паузой в протекании сварочного тока перед коротким замыканием;

$I_{к.з.}$  – пиковым значением тока короткого замыкания;

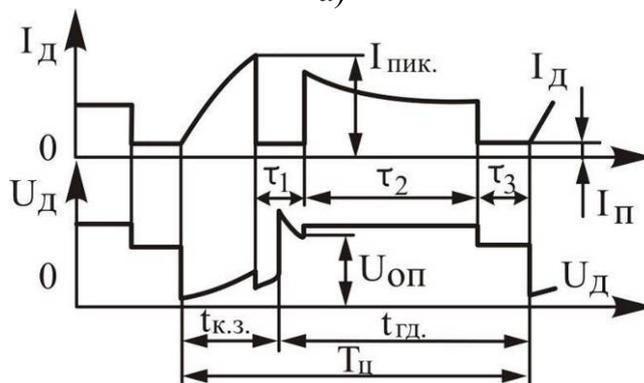
$I_n$  – значением тока паузы.

Представленный процесс сварки осуществляется следующим образом (рис. 3.11, а). По началу короткого замыкания происходит образование устойчивой перемычки между непрерывно подаваемым электродом и сварочной ванной. Перемычка интенсивно разогревается джоулевым теплом и разрушается. При этом по началу разрушения перемычки происходит уменьшение величины тока от пикового значения  $I_{к.з.}$  до величины тока паузы  $I_n$ . Длительность вводимой паузы  $\tau_1$  задаётся параметрически и определяется временем, необходимым для разрушения перемычки и повторного возбуждения дуги. Повторное возбуждение дуги происходит при величине тока паузы  $I_n$ . После окончания паузы  $\tau_2$  происходит увеличение сварочного тока до величины горения дуги, причем длительность горения  $\tau_2$  задается также параметрически и определяется диаметром электродной проволоки, скоростями процесса

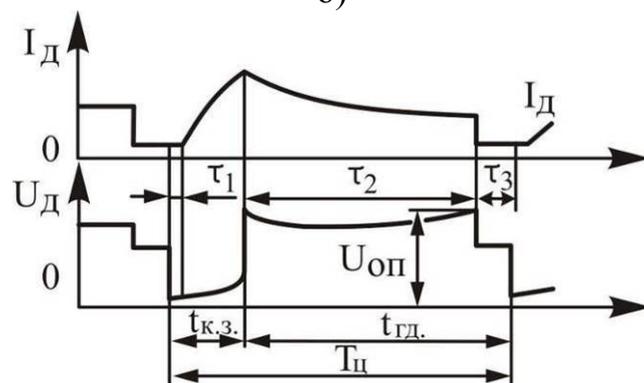
сварки, вылетом, напряжением холостого хода источника питания и другими параметрами. После окончания времени  $\tau_2$ , задаваемого для расплавления определенного количества электродного металла, происходит уменьшение величины сварочного тока до величины тока паузы  $I_n$ . При этом происходит резкое ограничение скорости плавления электродного металла и ослабление сил, препятствующих переносу электродного металла в сварочную ванну.



а)



б)



в)

Рис. 3.11. Эпюры токов и напряжений способов сварки со стабилизацией параметров

Капля электродного металла, находящаяся перед этим на боковой поверхности электрода, стремится в этот момент занять соосное с ним положение, а сварочная ванна, не удерживаемая больше давлением дуги, устремляется в направлении непрерывно подаваемого электрода. Вследствие этих взаимонаправленных движений происходит принудительное короткое замыкание. По началу короткого замыкания происходит увеличение сварочного тока. При этом, поскольку ток увеличивается к своему пиковому значению от небольшой величины тока паузы, то происходит благоприятное развитие контакта капли электродного металла и сварочной ванны в первой фазе короткого замыкания, что способствует изменению направления действия электродинамической силы, которая ускоряет образование жидкой перемычки и ее разрушение.

В рассмотренном способе сварки начальные условия дозирования энергии плавления электрода могут изменяться от цикла к циклу. Это зависит от пространственного положения капли электродного металла перед коротким замыканием, от подвижности и высоты гребня сварочной ванны, длительности короткого замыкания, скорости подачи и др. Все эти факторы определяют длину дуги в момент повторного возбуждения. Параметрическое дозирование энергии плавления электрода при различной начальной длине дуги приводит к расплавлению различного количества электродного металла к моменту его окончания. При этом, в процессе сварки наблюдается некоторый разброс его мгновенных показателей ( $I_{к.з.}$ ,  $t_{к.з.}$ ,  $\phi_{к.}$  и др.). Поэтому в процессе сварки дозирование энергии плавления необходимо производить с учетом начальных условий.

При сварке в вертикальном и потолочном положениях сварочная ванна характеризуется большей подвижностью, что обеспечивается либо её отекаем (вертикальное положение), либо её отвисанием (потолочное и полупотолочное положения). Поэтому для стабилизации её движения необходимо управление динамическим воздействием, как в момент повторного возбуждения, так и на интервале дозирования энергии плавления электрода (рис. 3.11, в) [89]. Регулируя величину опорного напряжения, при котором оканчивается длительность дозирования энергии плавления, можно удерживать расплавленный металл либо в хвостовой части сварочной ванны (вертикальное положение), либо непосредственно под торцом электрода, не отбрасывая его в хвостовую часть сварочной ванны (что необходимо в потолочном и полупотолочном положениях). С учетом того, что в полупотолочном и потолочном положениях встречное движение сварочной ванны в механизме коротких замыканий отсутствует, по началу короткого замыкания вводится кратковременная пауза порядка  $(25 \div 100) \cdot 10^{-6}$  с. Эта временная задержка

позволяет обеспечить благоприятное развитие контакта капли расплавленного электродного металла и сварочной ванны.

### **3.5. Устройство импульсных стабилизаторов (ИС)**

Импульсные стабилизаторы позволяют наиболее полно устранить недостатки процесса сварки, т.к. они реализуют способы сварки, в которых осуществляется строгое дозирование энергии плавления электрода и уменьшение сил отталкивания капли и ванны перед короткими замыканиями.

Импульсные стабилизаторы, реализующие представленные выше способы сварки, должны иметь следующие основные блоки:

- Источник постоянного тока для питания сварочной цепи и элементов блоков системы (может применяться любой серийный, имеющий жесткую или пологопадающую внешнюю характеристику, например, ПСГ-500, ВС-300, ВС-500, ВС-600, ВДГ-301, ВДГ-302, ВДУ-504 и др.);

- токоограничивающее устройство (в данном случае может использоваться стандартный сварочный дроссель, встроенный в источник питания типа ВС-300, ВС-600, ВДГ-302, ВДУ-504 и др.);

- тиристорный ключ с принудительной коммутацией последовательного типа [90–92], работающий с обратными связями по мгновенным показателям процесса и обеспечивающий требуемую форму тока короткого замыкания;

- секционированный резистор, необходимый для протекания тока паузы на интервале выключенного состояния тиристорного ключа;

- схему управления тиристорным ключом, обеспечивающую управление по мгновенным показателям процесса.

В общем случае схема управления ИС имеет: датчик непрерывного контроля размеров перемычки, линии задержки, определяющие паузу в протекании сварочного тока и дозирование энергии плавления электрода, блоки задания, сравнения, интегрирования и др., необходимые для удовлетворения алгоритма управления разработанных методов сварки.

Разработанная блок-схема импульсного стабилизатора (рис. 3.12) [93] полностью удовлетворяет сформулированным выше требованиям, обеспечивает стабилизацию процесса на стадии каплеобразования и имеет высокую устойчивость при воздействии мгновенных возмущений.

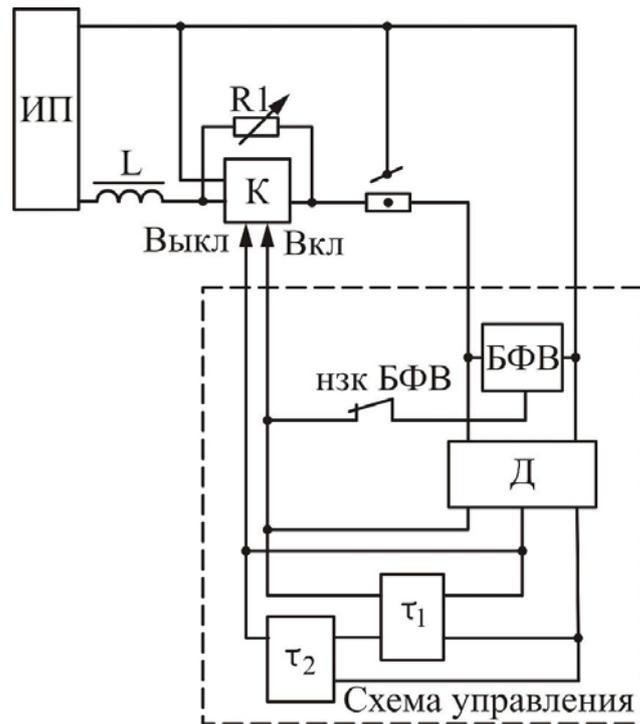


Рис. 3.12. Блок-схема импульсного стабилизатора:

*ИП - источник питания; L – сглаживающий дроссель; K – тиристорный ключ; R – секционированный резистор; БФВ – блок форсированного возбуждения; Д - датчик непрерывного контроля размеров перемычки;  $\tau_1$  – линия задержки, определяющая паузу в протекании сварочного тока;  $\tau_2$  – линия задержки, дозирующая энергию плавления электрода*

Процесс сварки в среде  $\text{CO}_2$  носит импульсно-дуговой характер, поэтому для его стабилизации могут быть применены системы питания, используемые для импульсно-дуговой сварки [94, 95].

По характеру преобразования энергии такие системы могут быть разделены на два типа [94]:

- системы с накоплением энергии;
- системы с непосредственным преобразованием энергии электрической сети через выпрямитель и понижающий трансформатор.

Для управления процессом сварки в среде  $\text{CO}_2$  с короткими замыканиями дугового промежутка применяется много схем. Основными их недостатками являются большие габариты и вес, большая инерционность, низкая устойчивость в работе и плохие энергетические показатели. Кроме того, большинство устройств созданы для решения частных вопросов по уменьшению основных недостатков процесса сварки и не

обеспечивают всех требований к устойчивому и стабильному его протеканию.

Работа тиристорного ключа в сварочной цепи постоянного тока имеет свою специфику, которая обуславливается статическими и динамическими характеристиками источника питания и дуги, характером плавления и переноса электродного металла, процессом возбуждения, технологическими требованиями и т.д. [94].

Устройства, использующие схему тиристорного ключа с принудительной коммутацией (рис. 3.13), могут работать по любой программе определяемой ходом процесса сварки, что выгодно отличает их от применявшихся ранее для этой цели устройств. Они имеют меньше массогабаритные и лучшие энергетические показатели, обладают высокой устойчивостью и надежностью работы [94]. Характерные эпюры напряжений на элементах схемы при работе такого устройства представлены на рис.3.14.

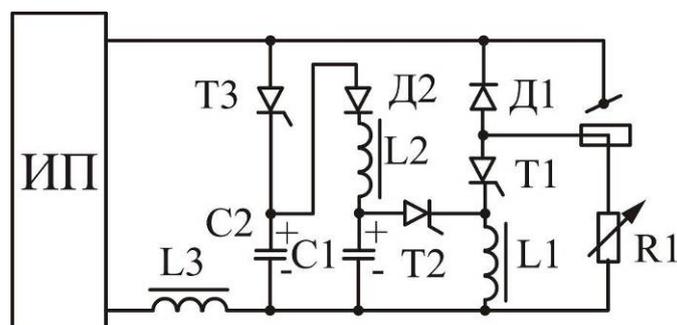


Рис. 3.13. Схема тиристорного ключа с принудительной коммутацией последовательного типа: ИП – источник питания постоянного тока;  $T_1$  – силовой тиристор;  $T_2$  – вспомогательный тиристор;  $T_3$  – тиристор импульсного фильтра;  $L_1$  – коммутирующий дроссель;  $L_2$  – зарядный дроссель;  $L_3$  – сглаживающий дроссель;  $C_1$  – коммутирующий конденсатор;  $C_2$  – фильтрующий конденсатор;  $R_1$  – балластный резистор;  $D_1$  и  $D_2$  – блокирующие диоды

Устройство работает следующим образом: по началу короткого замыкания переходит в открытое состояние силовой тиристор  $T_1$ . При этом по цепи (+)ИП – дуга –  $T_1$  –  $L_1$  –  $L_3$  – (–)ИП протекает ток короткого замыкания. При достижении переключкой критических размеров в открытое состояние переходит тиристор  $T_3$ . С этого момента по цепи (+)ИП –  $T_3$  –  $C_2$  –  $L_3$  – (–)ИП протекает ток заряда фильтрующего конденсатора  $C_2$  а по цепи (+)ИП –  $T_3$  –  $D_2$  –  $L_2$  –  $C_1$  –  $L_3$  – (–)ИП ток заряда коммутирующего конденсатора с полярностью, указанной на рисунке 3.13.

Ток заряда коммутирующего конденсатора  $C_1$  протекает с запаздыванием относительно тока заряда фильтрующего конденсатора  $C_2$  на время, определяемое величиной индуктивного сопротивления зарядного дросселя  $L_2$  и соотношением параметров конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . На интервале открытого состояния тиристора  $T_3$  в сварочной цепи будет иметь место ступенчатое уменьшение тока, что позволяет значительно уменьшить энергию, при которой происходит разрушение перемычки в момент повторного возбуждения дуги.

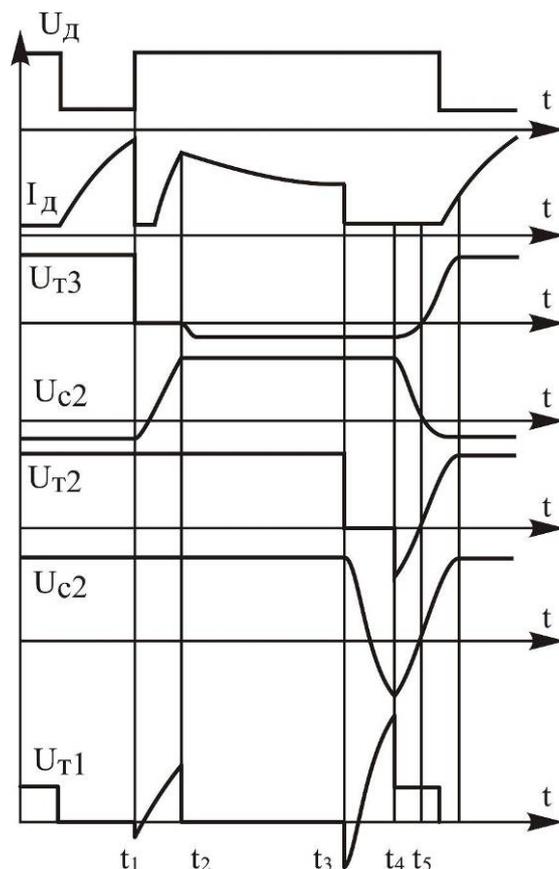


Рис. 3.14. Эюры напряжений на основных элементах схемы тиристорного ключа

Процесс заряда фильтрующего  $C_2$  и коммутирующего  $C_1$  конденсаторов носит резонансный характер, поэтому величины напряжений, до которых заряжаются эти конденсаторы, превышают напряжение источника ИП. Тиристор  $T_3$  переходит в непроводящее состояние в тот момент, когда к нему прикладывается в обратном направлении напряжение большее, чем напряжение источника питания ИП.

Энергия, запасенная в эквивалентном индуктивном сопротивлении источника питания ИП во время короткого замыкания и во время заряда

фильтрующего  $C_2$  и коммутирующего  $C_1$  конденсаторов, выделяется на дуге промежутке и способствует значительной интенсификации плавления электродной проволоки, что значительно улучшает его энергетические показатели.

После расплавления требуемого количества электродного металла в открытое состояние переходит вспомогательный тиристор  $T_2$ , который обеспечивает закрытие силового тиристора  $T_1$  в момент положительной полуволны колебательного процесса в коммутирующем контуре  $C_1 - T_2 - L_1$ . После перехода тиристора  $T_1$  в закрытое состояние ток в сварочной цепи протекает  $(+)ИП - дуга - R_1 - L_1 - (-)ИП$ . Величина тока в этот момент определяется параметрами секционированного резистора  $R_1$ , который выбирается таким, чтобы значительно уменьшить скорость плавления электродного металла.

Диод  $D_1$  необходим для надежного выключения силового тиристора  $T_1$ , т.к. в случае его отсутствия обратный ток, создаваемый контуром коммутации, протекает через дуге промежутке и при небольшом удлинении сварочных проводов силовой тиристор из-за увеличения активно-индуктивного сопротивления последних не выключается.

Вспомогательный тиристор  $T_2$  переходит в непроводящее состояние в момент отрицательной полуволны колебательного процесса в коммутирующем контуре  $C_1 - T_2 - L_1$ . Полярность напряжения на коммутирующем конденсаторе при этом устанавливается противоположной указанной на рисунке 3.13. С этого момента происходит восстановление напряжения на коммутирующем конденсаторе  $C_1$  с полярностью, указанной на рисунке, по цепи  $C_1 - C_2 - D_2 - L_1 - C_1$ . Контур коммутации готов к новому циклу срабатывания.

Особенности работы данного устройства заключаются в том, что к моменту разрыва переключки напряжение на фильтрующем конденсаторе  $C_2$  будет близко к нулю, либо иметь полярность, противоположную указанной на рисунке 3.13. Это достигается соответствующим подбором параметров конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Поэтому в момент включения тиристора  $T_3$  будет происходить резонансный заряд фильтрующего конденсатора  $C_2$ , чем обеспечивается крутой спад на кривой сварочного тока от своего максимального значения до минимального, при котором происходит разрушение переключки. Параметры фильтрующего конденсатора и сглаживающего дросселя  $L_3$  выбираются такими, чтобы обеспечивалось открытое состояние тиристора  $T_3$  на время разрыва переключки и возбуждения дуги, т.е. на том интервале, на котором необходимо ступенчатое уменьшение тока.

Поскольку добротности зарядного контура коммутирующего конденсатора ( $D_2 - L_2 - C_1$ ) коммутирующего контура ( $C_1 - T_2 - L_1$ ) и переза-

рядного контура  $C_1 - C_2 - D_2 - L_2 - C_1$  достаточно высокие, потери в них будут небольшими, поэтому вся энергия источника питания в основном используется для плавления электродного металла и лишь незначительная её часть тратится на потери в активном сопротивлении секционированного резистора  $R_1$  на интервале паузы сварочного тока и небольшие потери в перечисленных выше контурах. Все это обуславливает высокие энергетические показатели устройства.

## ГЛАВА 4. ТЕХНИКА СВАРКИ ШВОВ ВО ВСЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

### 4.1. Эффективность газовой защиты зоны сварки

Надежная защита зоны сварки чистым защитным газом является одним из основных условий получения шва без пор высокого качества. Защита необходима до полного затвердевания жидкой ванны. В большинстве случаев защита осуществляется путем подачи к месту сварки струи защитного газа. Истечение газов из сопел, сварочных горелок имеет турбулентный характер. С наружной стороны струя газа неизбежно смешивается с воздухом, и только внутренняя часть ее состоит из чистого защитного газа (рис. 4.1).

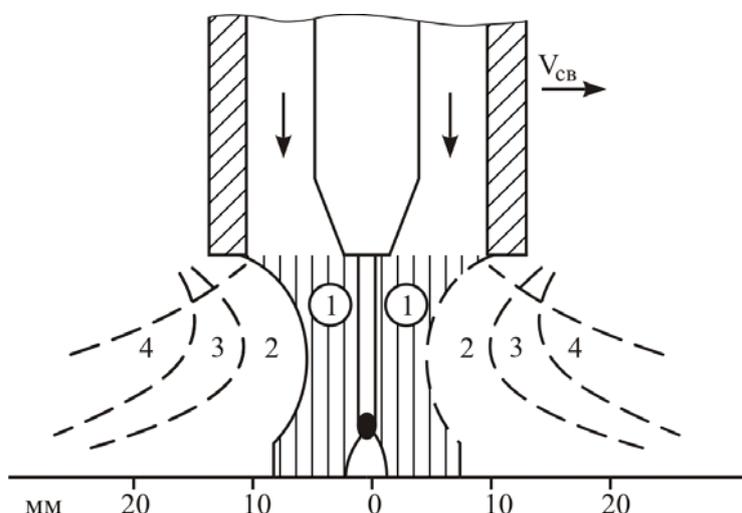


Рис. 4.1. Состав струи углекислого газа, истекающего из сопла сварочной горелки: 1 – 100 %  $CO_2$ ; 2 –  $CO_2$  + 10 % воздуха; 3 –  $CO_2$  + 60 % воздуха; 4 –  $CO_2$  + 80 % воздуха [96]

Форма потока газа и эффективность защиты зависят от типа защитного газа, типа сварного соединения и скорости сварки (рис. 4.2), движения окружающего воздуха (ветра, сквозняка). При использовании углекислого газа легче обеспечить хорошую защиту, чем при сварке в смесях с аргоном. При сварке угловых швов с внутренней стороны угла и стыковых швов защита намного лучше, чем при сварке угловых швов с наружной стороны угла. Для улучшения защиты в этом случае рекомендуется применять съемные щитки. При повышенных скоростях сварки эффективность защиты ухудшается.

Для улучшения защиты рекомендуется уменьшать расстояние между горелкой и деталью, наклонять горелку «углом вперед» до  $10^\circ$  и

увеличивать расход защитного газа. Исходя из удобства наблюдения за дугой расстояние от горелки до изделия, обычно, принимают равным 10–30 мм. Наклон горелки «углом вперед» более  $15^\circ$  и чрезмерный расход газа приводят к подосу воздуха в зону сварки и нарушению защиты. Для защиты от ветра зону сварки закрывают щитами, со стороны ветра или переносными палатками. Эффективность газовой защиты, в значительной степени, определяется конструкцией и размерами горелки, которые выбирают с учетом рода защитного газа, типоразмера сварного соединения и режима сварки. Истечение газа из горелки должно быть равномерным по всему сечению сопла. Для обеспечения этого применяют различные схемы ввода газа в сопло горелки (рис. 4.3). Мундштук целесообразно несколько утопить в горелке.

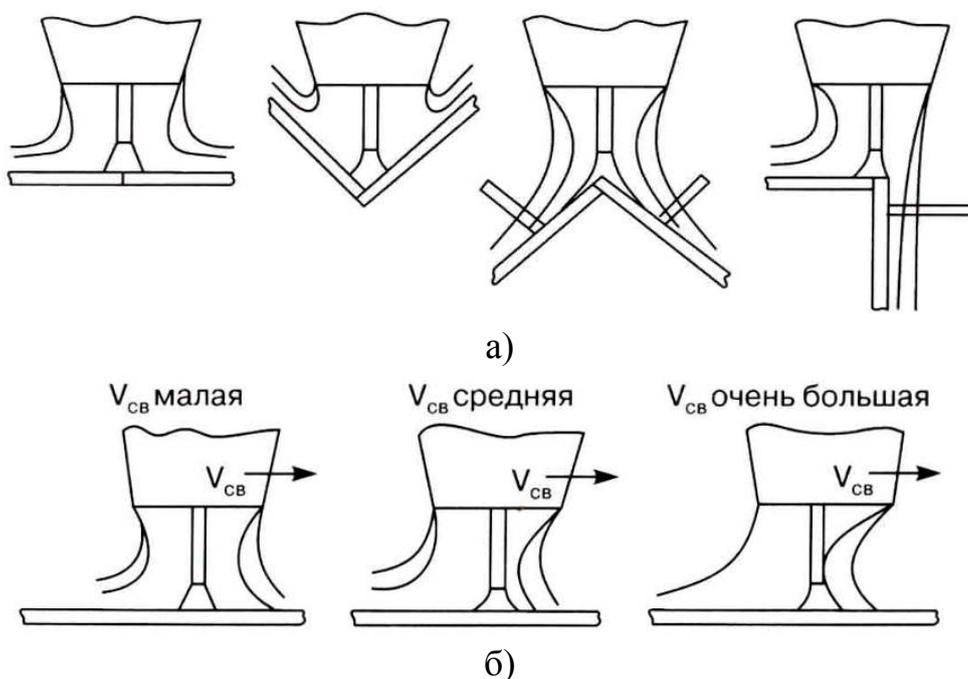


Рис. 4.2. Влияние на эффективность газовой защиты: а) типа сварного соединения; б) скорости сварки

Для улучшения истечения газа внутреннюю полость сопла делают параболической или конической с цилиндрической частью на выходе (рис. 4.3, б, в). Для предупреждения попадания воздуха в сопло через канал для прохода проволоки на входе последней устанавливают уплотнители или подводят газ в канал.

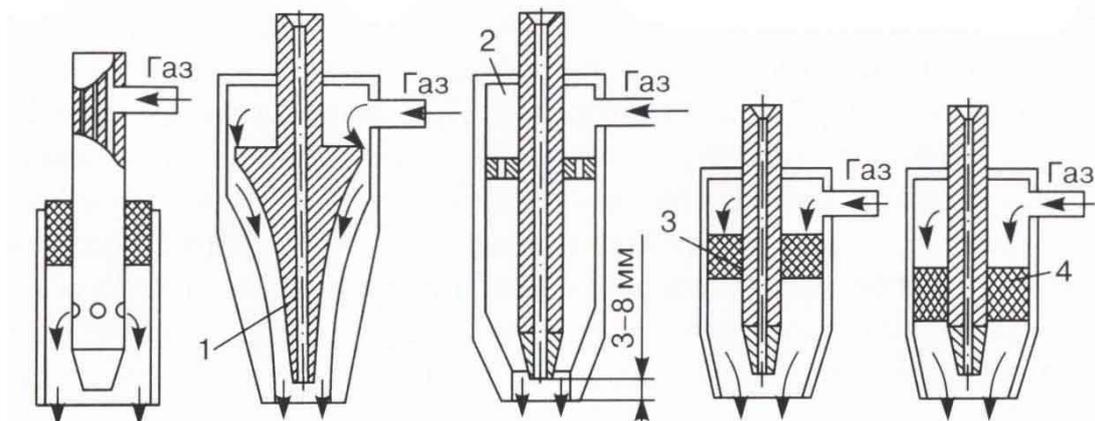


Рис. 4.3. Схема подвода газа в сварочных горелках: а) с кольцевым подводом газа; б) с отражателями; в) с успокоительными камерами; г) с сеточными вставками; д) с металлокерамическими вставками (1 – отражатель газа; 2 – успокоительная камера; 3 – сетка; 4 – металлокерамика)

## 4.2. Параметры режима сварки

Процесс сварки – это совокупность физических и электрических явлений различных в начале процесса, основной части шва и конце сварки. Поэтому технику выполнения сварки разделяют на три этапа: начало сварки, стабильное течение и окончание сварки. Начало сварки – это отрезок времени, на протяжении которого происходит зажигание дуги и достижение заданных параметров режима сварки. Стабильное течение процесса – это отрезок времени, на протяжении которого заданный режим сварки сохраняется неизменным и происходит образование шва. Прекращение сварки – отрезок времени, на протяжении которого происходит переход от стабильного течения процесса до окончания сварки.

Стабильный процесс сварки, с технологической точки зрения, должен обеспечить получение сварного соединения с неизменными заданными свойствами и размерами. Процесс можно считать стабильным, если электрические и тепловые характеристики его не изменяются во времени или же изменяются по определенной программе. Стабильный процесс сварки получают при постоянных величинах напряжения и тока, при периодически изменяемых величинах напряжения и тока или при непрерывном и прерывистом горении дуги, а также при перерывах протекания тока в сварочной цепи. Процессы сварки дугой с неизменяющимися во времени напряжением и током дуги называют стацио-

нарными, а с принудительно изменяемыми во времени напряжением и током – нестационарными или импульсными.

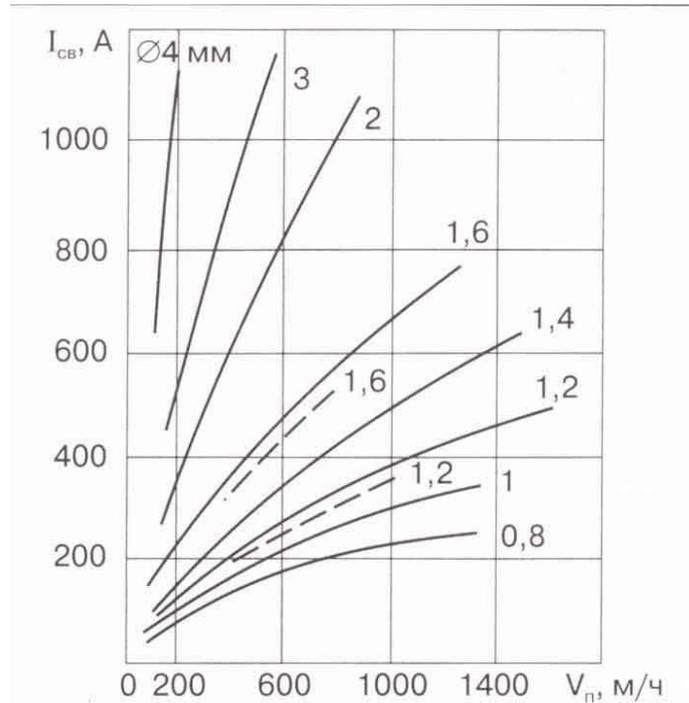
В связи с этим для оценки технологии сварки используют средние значения тока и среднее напряжение, учитывающее падение напряжения на дуге и вылете электрода без учета падения напряжения на сварочной цепи. Технологически стабильный процесс сварки в защитных газах плавящимся электродом, в большинстве случаев, обеспечивается при постоянной скорости подачи электродной проволоки, постоянном вылете электрода и неизменной настройке напряжения источника тока. Исключение составляют процессы сварки с поступательно-возвратной (вибрирующей) подачей. В этих процессах технологически стабильный процесс также обеспечивается при средней постоянной скорости подачи электродной проволоки.

Основными технологически параметрами режима сварки в защитных газах плавящимся электродом являются: средняя величина тока и скорость подачи проволоки, среднее напряжение сварки, полярность, диаметр и вылет электродной проволоки, скорость сварки, состав и расход защитного газа; наклон и колебания электрода, направление сварки. Сварку в защитных газах плавящимся электродом в большинстве случаев выполняют на постоянном токе обратной полярности, а наплавку на прямой полярности.

Сила тока определяется полярностью, диаметром, составом, скоростью подачи и вылетом электрода, составом защитного газа. Регулируют силу тока изменением скорости подачи проволоки, (рис. 4.4).

С увеличением тока увеличивается глубина провара, скорость расплавления электрода и производительность сварки. С увеличением вылета электрода величина тока уменьшается. На прямой полярности значения силы тока, примерно на 70% меньше, чем на обратной, при этом уменьшается глубина провара, увеличивается скорость расплавления электрода.

Второй важнейший параметр режима сварки – напряжение процесса сварки. Напряжение сварки задается настройкой источника тока. С повышением напряжения увеличивается длина дуги, ширина шва и улучшается формирование валика. Однако одновременно увеличиваются разбрызгивание, угар элементов и излучение дуги, а также повышается чувствительность дуги к магнитному дутью. Стабильный процесс сварки с хорошим формированием шва и малым разбрызгиванием можно получить только в определенном диапазоне сил тока и оптимальных напряжений, которые зависят от силы тока, диаметра и состава электрода (см. рис. 2.2), а также от состава и способа газовой защиты.



*Рис. 4.4. Зависимость силы тока при сварке в  $CO_2$  от скорости подачи электродной проволоки Св-08Г2С (обратная полярность, вылеты средние для каждого диаметра электрода)*

С увеличением скорости сварки уменьшаются размеры шва. Наклон электрода «углом вперед» уменьшает глубину провара и увеличивает ширину шва, а «углом назад» увеличивает глубину провара и уменьшает ширину шва. При наклонах электрода на угол больше  $15^\circ$  от вертикали ухудшается формирование шва, увеличивается разбрызгивание.

Состав защитного газа существенно влияет на технологические характеристики процесса. Так, в  $CO_2$ , смесях  $Ar+CO_2$  более 25% и  $Ar+O_2$  5%+ $CO_2$  более 20% на малых токах и низких напряжениях на режимах с принудительными короткими замыканиями сварку можно выполнять во всех пространственных положениях. При сварке в смесях  $Ar+O_2+CO_2$  менее 25% и  $Ar+CO_2$  менее 25% на токах больше критических значений наблюдается струйный перенос электродного металла, очень небольшое разбрызгивание и хорошее формирование шва, но сварку можно выполнять только в нижнем положении. При сварке в смесях  $Ar+O_2+CO_2$  менее 15% и  $Ar+CO_2$  менее 15% успешно применяют импульсно-дуговую сварку швов во всех пространственных положениях.

### 4.3. Сборка и особенности сварки основных типов соединений

Подготовка деталей для сварки состоит из подготовки размеров деталей в соответствии с чертежами конструкций. Кромки свариваемых соединений подготавливают механической обработкой (строжкой, резкой и т.п.) или термической резкой в зависимости от толщины металла и типа соединений. Участки деталей, прилегающие к свариваемым кромкам на ширину 20–40мм, подлежат зачистке механическим способом или абразивом до чистого металла. Кромки ответственных соединений после воздушно-плазменной резки требуют зачистки торцов для удаления слоя с повышенным содержанием азота. Очистка и подготовка кромок должны быть произведены до сборки соединений.

Сборка соединений под сварку плавящимся электродом в защитных газах зависит от типа соединения, толщины металла, расположения шва в пространстве, способа сварки (автоматическая или полуавтоматическая). Требования к качеству сборки и подготовки соединения под сварку в  $\text{CO}_2$  проволоками диаметром 0,8–2 мм должны соответствовать ГОСТ 1477-76. Чем выше качество сборки соединения, тем выше производительность. Во всех случаях, где это возможно, рекомендуется собирать и сваривать соединения в приспособлениях без прихваток. При сборке на прихватках их рекомендуется устанавливать с обратной стороны соединения. Прихватку можно выполнять сваркой неплавящимся электродом, сваркой тонкой проволокой в  $\text{CO}_2$ , контактной сваркой. Применение ручной сварки штучными электродами не рекомендуется. Размеры прихваток и их расположение зависят от толщины металла и типа свариваемого соединения. Прихватки перед сваркой должны быть тщательно очищены, а соединение продуто сжатым воздухом. При выполнении прихваток в  $\text{CO}_2$  проволоками 0,8–1,4 мм сборку осуществляют короткими швами. При условии обеспечения качественного начала и конца швов без дефектов прихватки не перевариваются, а остаются в соединении как основные швы.

***Начало процесса сварки.*** Эта стадия процесса сварки определяет провар соединения и качество шва, а также разбрызгивание в начале сварки. В большинстве случаев желательно иметь минимальную продолжительность начала процесса сварки, максимальный провар соединения и минимальное разбрызгивание металла.

При сварке в защитных газах проволоками сплошного сечения диаметром до 2,5 мм и порошковыми проволоками диаметром до 3,2 мм начало сварки выполняют путем предварительного закорачивания электрода на изделие или без предварительного закорачивания электрода на изделие путем пережигания проволоки.

Начало с предварительным закорачиванием электродной проволоки на изделие. Сварку начинают после закорачивания электродной проволоки на изделие. Затем нажатием пусковой кнопки включают подачу защитного газа, чтобы удалить воздух из зоны начала сварки. Через 1–2 с одновременно подается напряжение на электрод и включается двигатель подачи проволоки к изделию. Если в сварочной цепи обеспечиваются высокие скорости нарастания тока короткого замыкания (100–300 кА/с), конец электрода заострен и изделие зачищено, то электродная проволока перегревается и перегорает у изделия. Зажигается дуга, которая оплавляет электрод и изделие. Если напряжение источника и запас энергии, накопившейся в индуктивности сварочной цепи достаточны для горения дуги, то дуга не гаснет и начинается стабильное течение сварки (рис. 4.5, а).

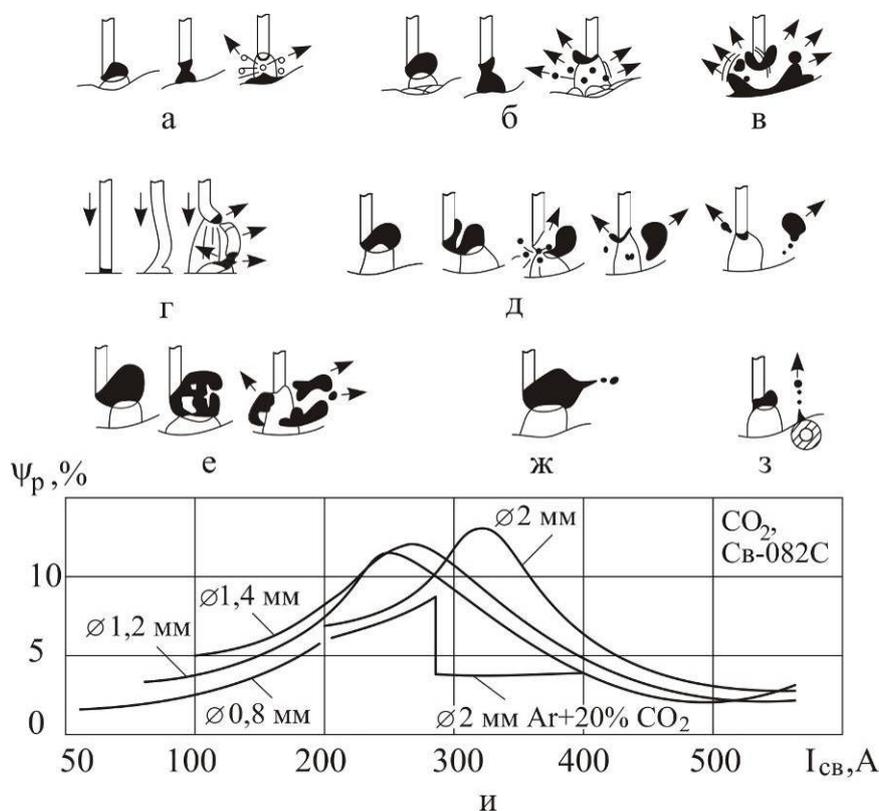


Рис. 4.5. Основные виды разбрызгивания при сварке в  $CO_2$ ,  $Ar+25\%CO_2$  с короткими замыканиями при средних скоростях нарастания силы тока короткого замыкания (а, б), при высоких скоростях нарастания силы тока короткого замыкания (в), в начале процесса сварки (г), непрерывно горячей дугой (д), при использовании ржавой проволоки (е, ж, з) и зависимость потерь  $\Psi_p$  от силы тока (и) (обратная полярность)

*Начало сварки без предварительного закорачивания электрода на изделие.* Сварку начинают включением кнопки «пуск». При этом включается газовый клапан и подача защитного газа. Через 1–2 с блок управления одновременно включает источник тока и двигатель подачи проволоки к изделию. Через некоторое время проволока приближается к изделию и с усилием прижимается к нему. Под действием тока короткого замыкания проволока нагревается, а под действием двигателя подачи проволоки изгибается и перегорает, чаще всего, у токоподвода. Зажигается дуга, перегоревший у токоподвода вылет электрода отбрасывается взрывом. Дуга, загоревшаяся между электродом и перегоревшим вылетом, растягивается и обрывается. Через время, зависящее от скорости подачи, проволока приближается к изделию и наступает второе короткое замыкание. Проволока нагретая и перегорает уже у изделия. Зажигается дуга. Если напряжение источника тока достаточно для поддержания горения дуги, то дуга не гаснет и с этого момента начинается стабильное течение процесса сварки (рис. 4.5, г). Продолжительность установления процесса сварки и разбрызгивание при этом приеме больше, чем при сварке с предварительным закорачиванием электрода на изделие.

Для получения хорошего начала сварки в  $\text{CO}_2$  проволоками сплошного сечения диаметром до 2,5 мм источник тока должен иметь высокие скорости нарастания тока короткого замыкания в сварочной цепи (100 кА/с и более). Длительность начала сварки существенно зависит также от состояния и формы конца электрода. Крупная капля обычно окислена и низ ее покрыт шлаком, что затрудняет контакт проволоки с изделием и ухудшает начало сварки. Малая капля, обычно слабо окислена и обеспечивает хороший контакт проволоки с изделием. Заострение электрода откусыванием плоскогубцами под косым углом обеспечивает перегорание электрода у изделия и хорошее начало после одного короткого замыкания электрода с изделием.

Увеличение наклона внешней характеристики источников тока от 0,02 до 0,1 В/А и повышение напряжения холостого хода улучшает начало процесса, провар в начале шва и сокращает длительность начала сварки. Однако, если длина дуги до обрыва больше расстояния между изделием и токоподводом, то после зажигания дуга может растянуться, перейти на токоподвод горелки и оплавить его. Поэтому при сварке тонкими проволоками, выполняемой с малыми вылетами электрода, ограничивают напряжения холостого хода источника тока.

Существенное влияние на длительность начала стабильного процесса сварки проволоками диаметром 0,8–1,4 мм оказывает вылет электрода (табл. 4.1). С увеличением вылета время начала, и разбрызгивание

увеличиваются. С увеличением диаметра электрода более 1,6 мм роль вылета уменьшается.

Таблица 4.1

*Рекомендуемые вылеты электродной проволоки для хорошего начала сварки в  $CO_2$  и смеси  $Ar+25\%CO_2$  на обратной полярности*

Диаметр электрода, мм	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Вылет электрода, мм	8–12	10–14	10–15	10–17	12–20

При сварке на малых токах (при малых скоростях подачи электродной проволоки) время начала больше, чем на средних токах. На больших токах (при больших скоростях подачи электродной проволоки) длительность начала больше, чем на средних токах, поэтому сварку начинают на малых скоростях подачи электродной проволоки с последующим увеличением до величин основного режима сварки. Такой прием называют «мягкий старт». Наложение импульсов тока, имеющих высокие скорости нарастания тока в импульсе (200–300 кА/с) с частотой 25–100 имп/с приводит к перегоранию электрода в месте контакта электрода с изделием, ускоряет начало сварки и увеличивает провар в начале шва. Вибрация электрода с частотой 50 Гц и более, также ускоряет начало сварки. Нагрев конца электрода также улучшает начало сварки. Известно, что уменьшение времени между сваркой отдельных швов до 3–10с улучшает начало сварки. При сварке порошковыми проволоками, а также в смеси  $Ar + CO_2$  начало сварки лучше, чем в чистом  $CO_2$ .

Начало сварки электродными проволоками диаметром 4–5 мм выполняют путем предварительного закорачивания электрода на изделие. После включения кнопки «пуск» включается подача защитного газа, подача напряжения на электрод и электродвигатель подачи проволоки от изделия. При отрыве электрода перегретый участок проволоки перегорает и загорается дуга. После зажигания дуги переключают электродвигатель на подачу проволоки к изделию. Другим вариантом начала сварки проволоками диаметром 4–5 мм является использование быстро расплавляющейся токопроводящей вставки (стружки), закладываемой между электродом и изделием. Начало производится одновременным включением газа, напряжения источника и электродвигателя механизма подачи проволоки к изделию. При перегорании вставки зажигается дуга и начинается стабильный процесс сварки.

Можно утверждать, что неполный провар соединений, наплывы и разбрызгивание в начале шва зачастую вызваны большой длительностью начала сварки при использовании серийно-выпускаемых выпрямителей, которые имеют малые скоростями нарастания тока короткого замыкания, а также увеличением активного и индуктивного сопротивления сварочной цепи. Что происходит при использовании сварочных кабелей заниженного сечения, некачественного соединения кабелей между собой и с изделием, а также укладки сварочных кабелей в кольца.

Шунтирование части обмотки дросселя выпрямителя на 1–2 секунды в начале сварки обеспечивает улучшение начала сварки.

Для улучшения провара в начале сварки рекомендуется начинать процесс несколько отступив от начала, а затем возвращаться к началу и после этого выполнять сварку шва.

### ***Прекращение процесса сварки.***

В современных аппаратах прекращение сварки производят путем снижения напряжения источника тока и уменьшения скорости подачи электродной проволоки (тока сварки) для заварки кратера. После заварки кратера выключают электродвигатель подачи электродной проволоки, а после обрыва дуги и затвердевания кратера шва отключают напряжение и подачу защитного газа. Эта программа обеспечивает заварку кратера, отсутствие разбрызгивания, небольшой вылет электрода и формирование на конце электрода небольшой капли, что обеспечивает качественное начало следующего шва без выполнения дополнительных операций. В аппаратах рассчитанных на малые токи прекращение сварки производят путем быстрой остановки подачи электродной проволоки без снижения напряжения источника тока и отключения подачи защитного газа. Однако, при сварке на токах больше 150А и повышенных напряжениях дуга оплавляет остановившуюся проволоку. На конце электрода остается крупная окисленная капля, кратер шва остается не заваренным и в нем возможно образования трещины. После обрыва дуги прекращают подачу защитного газа. Если напряжение холостого хода источника тока велико, то дуга может растянуться и оплавляя остановившуюся электродную проволоку перейти на токоподвод и оплавить его. Эта схема прекращения сварки не обеспечивает также качественного начала следующего шва без удаления крупной капли. Прекращение процесса путем растягивания дуги до обрыва путем отведения держателя приводит к образованию на конце электрода крупной окисленной капли и нарушению защиты газом жидкой ванны. В незаваренном кратере возможно образование трещины и также затрудняет начало следующего шва. Для заварки кратера также рекомендуют несколько возвращаться на шов.

### **Особенности сварки основных типов соединений.**

*Сварка сталей толщиной 0,5–1,2 мм.* Сварку выполняют на медных, стеклянных и керамических подкладках, а также на весу. Для получения швов высокого качества необходимы тщательная сборка, точное направление электрода по шву и поддержание неизменным режима сварки. Стыковые и угловые соединения рекомендуется выполнять с отбортовкой кромок. Сборку выполняют точками в  $\text{CO}_2$ , а нахлесточных соединений контактной сваркой. Для соединения металла применяют следующие способы:

1) сварка в  $\text{CO}_2$  на обратной полярности проволокой  $d_{\text{э}} = 0,7 \div 0,8$  мм на малых токах и низких напряжениях при питании от источника с пологопадающей внешней характеристикой и динамическими свойствами, обеспечивающими получение процесса с частыми короткими замыканиями. В качестве источников рекомендуются преобразователи ЗП 4/30 (АЗД 4/30), ЗП 7.5/30 и выпрямители И198\*, ВСП-160, ВС-300, ВС-300Б с включением в сварочную цепь активного сопротивления, ВДГ-306ДК и др.

2) сварка проволоками  $d_{\text{э}} = 0,7 \div 1,2$  мм с периодическим изменением мощности дуги или перерывами процесса. Изменение мощности или прекращение процесса производят с частотой 0,4 Гц. При этом дуга легко возбуждается на горячем металле, а тепловая инерция ванны обеспечивает равномерное проплавление и формирование шва.

*Сварку стыковых соединений* сталей малой толщины (0,6–1,2 мм) всегда рекомендуется выполнять в вертикальном положении сверху вниз с подводом тока к верхней части изделия. Сварку ведут вертикальным электродом, дугу направляют на ванночку жидкого металла. При сварке тонкого металла ширина провара обычно одинакова с обеих сторон стыка. При чрезмерно большой ширине шва возможны прожоги. Во избежание этого рекомендуется уменьшать напряжение дуги, диаметр электрода, сварочный ток и увеличивать скорость сварки. При сварке на подкладках важно обеспечивать плотное прижатие листов к подкладке. При нагреве дугой листы, деформируясь, теряют устойчивость и изгибаются непосредственно перед дугой, в результате сварка идет «на весу».

*Нахлесточные соединения* металла толщиной 0,6–1,5 мм сваривают на весу, на медной, стальной или стеклянной подкладке. Более толстый металл обычно сваривают на весу. Металл толщиной 0,6–1,5 мм сваривают вертикальным электродом, направленным на кромку верхнего листа. Смещение электрода от кромки до  $\pm(1-1,5)$  мм обеспечивает получение соединения высокого качества. При большем смещении электрода в сторону нижнего листа возможны прожоги, а в сторону

верхнего – ухудшение формирования шва и недостаточный провар нижнего листа. Для получения соединения высокого качества могут быть использованы те же приемы, что и при сварке стыковых швов. Максимальная скорость сварки достигается при выполнении соединений в вертикальном положении «сверху вниз». Тщательная сборка также позволяет повысить скорость сварки. Металл малой толщины рекомендуется сваривать в  $\text{CO}_2$  с частыми короткими замыканиями, при этом достигаются наименьшие деформации изделия.

*Стыковые соединения сталей толщиной 1,5–3,5 мм* легко сваривать в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  20–25% или  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  20%+  $\text{O}_2$  «на весу» или на медных подкладках. Угловые соединения выполняют «на весу» с внутренней стороны угла. Дугу направляют на ванну жидкого металла, сварку можно выполнять во всех положениях. Для сварки следует выбирать такие режимы, чтобы полный провар получался за один проход. При значительных зазорах в соединении сварку рекомендуется выполнять в вертикальном положении «сверху вниз»; сваривать шов с периодическим прекращением процесса или изменением мощности.

*Тавровые, угловые и нахлесточные соединения* можно сваривать наклонным электродом при вертикальном расположении стенки соединения и вертикальным электродом при расположении шва в лодочку. При сварке наклонным электродом угол наклона его к полке должен составлять 40–50°.

*Нахлесточные соединения* металла толщиной более 1,5 мм сваривают электродом, наклоненным поперек шва на 50–60° к поверхности листов. При сварке металла равных толщин электрод направляют в угол, а неравных – в сторону листа большей толщины. Некоторые режимы сварки сталей малых толщин приведены в приложении 1.

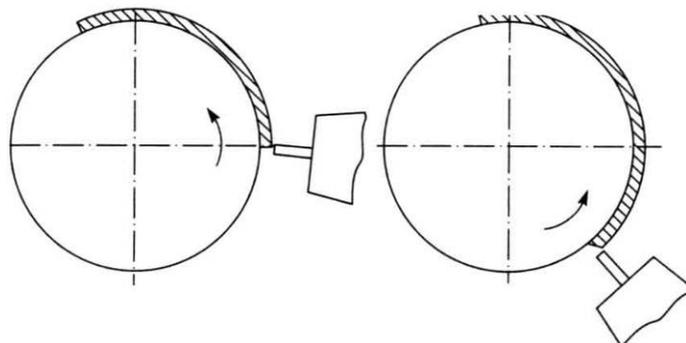
*Стали толщиной 4–12 мм* сваривают в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2+\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  20–25% или  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  20%+  $\text{O}_2$  во всех пространственных положениях. Разделку выполняют в зависимости от толщины металла и расположения шва (приложение 1).

Для получения качественного стыкового соединения необходимо предупредить подсос воздуха с обратной стороны соединения. Для этого рекомендуется первый проход соединения выполнять на медной, стеклянной или керамической подкладке. Обязательна продувка защитным газом соединения перед сваркой. Первый проход сваривают в  $\text{CO}_2$  проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Последующие проходы могут быть выполнены сваркой в  $\text{CO}_2$ , сваркой в смеси  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  или под флюсом. Форма провара зависит от наклона электрода и изделия. При сварке «углом вперед» с наклоном электрода до 15° от вертикали, а также при сварке наклонных соединений на спуск глубина провара уменьша-

ется, а ширина шва увеличивается. При сварке «углом вперед» удобнее наблюдать за направлением электрода по разделке. При сварке «углом назад» с наклоном электрода на  $10\text{--}15^\circ$  глубина провара и высота усиления увеличиваются, а ширина шва уменьшается. При этом удобнее наблюдать за формированием шва.

#### **Техника сварки поворотных кольцевых швов.**

Первый проход сваривают в вертикальном положении сверху вниз (рис. 4.6). Остальное сечение – со смещением с зенита, в зависимости от толщины металла и режима сварки. При толщине металла до 8 мм смещение дают в сторону противоположную направлению вращения изделия, а при большей толщине в сторону вращения детали (рис. 4.7). При этом рекомендуется сварка с принудительным формированием шва в  $\text{CO}_2$  полупогруженной дугой с подачей небольшого количества флюса. Для получения плотного шва и хорошего провара в начале сварки необходимо обеспечить предварительную подачу газа до зажигания дуги и начинать сварку вертикальным электродом, а также выполнять сварку с программированием напряжения, тока и скорости подачи электрода. Для получения качественного окончания процесса сварки необходимо заварить кратер, и обдуть его газом до полного затвердевания металла. При сварке с большой силой тока для заварки кратера, нужно уменьшить силу тока и напряжение (ориентировочно до 150–170 А и 21–22 В). Для окончания сварки могут быть использованы также другие приемы, осуществляемые с программированием напряжения.



*Рис. 4.6. Схема расположения электрода при сварке в  $\text{CO}_2$  поворотных кольцевых швов тонкой стали на весу*

При неравномерных зазорах в стыковых соединениях сталей средних и больших толщин первый проход рекомендуется выполнять сваркой в  $\text{CO}_2$  проволокой диаметром 1,2 мм без колебаний электрода, с колебаниями «змейкой» или возвратно-поступательными движениями вдоль шва. Возвратно-поступательные движения горелки обеспечивают снижение пористости при сварке во всех активных газах. Этому способ-

ствуют как улучшение защиты, так и перемешивание и замедленное охлаждение жидкой ванны. Остальное сечение разделки выполняют в смеси  $Ar+CO_2$  25% и  $Ar+CO_2 + 3-5\% O_2$ . С поперечными колебаниями электрода (рис. 4.8). Некоторые режимы сварки стыковых соединений приведены в приложении 1.

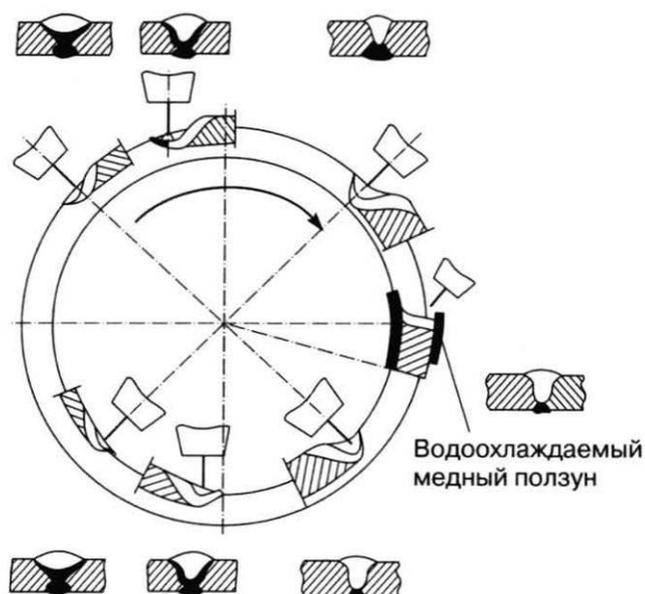


Рис. 4.7. Расположение электрода при сварке в  $CO_2$  поворотных кольцевых соединений из толстой стали

**Тавровые и угловые соединения сталей средних толщин** можно сваривать при вертикальном расположении стенки соединения электродом наклонным поперек шва или вертикальным электродом при расположении шва в лодочку. При сварке наклонным электродом угол наклона его к полке должен составлять  $40-50^\circ$ . При сварке швов с катетом до 5 мм и одинаковой толщине листов электрод направляют в угол, при неодинаковой толщине – в сторону листа большей толщины. При сварке тавровых соединений на стали толщиной более 5 мм электрод смещают на 0,8–1,5 мм в сторону полки. При сварке сталей большей толщины делают скос кромки. В этом случае электрод направляют в угол разделки.

Для повышения производительности и улучшения формирования шва целесообразно выполнять сварку на спуск. При сварке тавровых и угловых соединений можно рекомендовать приемы, повышающие скорость расплавления электрода: сварку с подачей присадочной проволоки, с увеличенным вылетом, с дополнительным нагревом электрода и др. Некоторые режимы сварки тавровых и угловых соединений приведены в приложении 1.

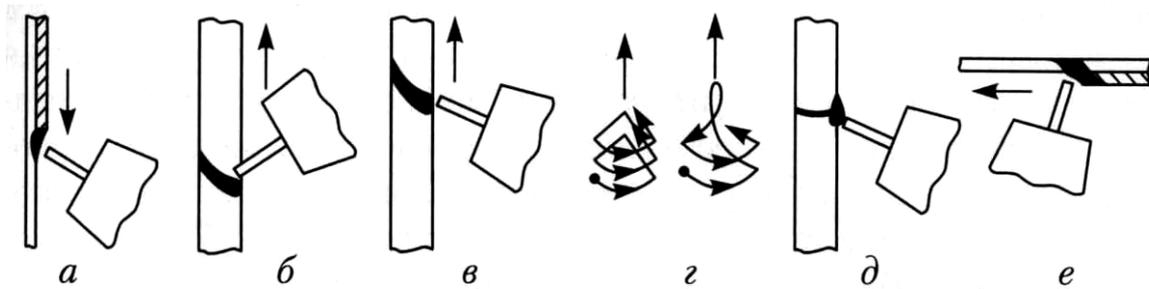


Рис. 4.8. Схемы расположения и поперечных колебаний электрода при сварке в  $CO_2$  швов: а) вертикальных сверху вниз; б–г) вертикальных снизу вверх; д) горизонтальных; е) потолочных

**Замковые соединения** наиболее часто применяют при сварке кольцевых швов. Такие соединения выполняют с разделкой кромок согласно ГОСТ 14771-76. Режимы сварки выбирают в зависимости от толщины листов и диаметра изделия. Замковые соединения позволяют выполнять сварку первых проходов на больших токах, поскольку в данном случае отсутствует опасность прожога листов. При сварке кольцевых замкнутых швов сосудов во избежание появления пор в корне шва требуется сборка без зазоров. Поэтому замок делают скошенным и детали собирают с натягом. Для повышения производительности сварки поворотных швов, улучшения формирования шва и уменьшения разбрызгивания, электрод смещают с зенита, так чтобы вести сварку на спуск (рис. 4.7). При сварке «углом назад» рекомендуют наклонять электрод на  $5-15^\circ$ . В этом случае можно несколько увеличить глубину провара, но ширина шва уменьшается. Для расширения шва сварку выполняют с колебаниями электрода.

**Вертикальные швы** сваривают как со свободным, так и с принудительным формированием (приложение 1). Металл толщиной до 4 мм обычно сваривают «сверху вниз» со свободным формированием швов. Сварку выполняют тонкими проволоками диаметром 0,8–1,4 мм в  $CO_2$ , реже в смеси  $Ar+CO_2$  более 25%. Сварку вертикальных швов «сверху вниз» ведут углом назад, направляя дугу на переднюю часть ванночки (рис. 4.7). Это обеспечивает поддержание сварочной ванны от стекания, увеличение проплавления корня шва и исключает несплавления и натеки по краям шва. При сварке тонкого металла эта техника исключает прожоги металла. Металл толщиной до 3 мм сваривают без колебаний электрода, металл большей толщины – с поперечными колебаниями электрода (рис. 4.8).

Требования к качеству сборки при сварке сверху вниз менее жесткие, чем при сварке в нижнем положении. Поэтому сварку сверху вниз

применяют для выполнения корневых швов при наличии переменных зазоров. Скорость сварки «сверху вниз», обычно в 2–2,5 раза выше, чем сварки «снизу вверх». Для уменьшения разбрызгивания и увеличения провара рекомендуют вести сварку на пониженных напряжениях при питании от источников с повышенными динамическими свойствами по току.

При выполнении вертикальных швов «сверху вниз» на повышенных токах и напряжениях, в  $\text{CO}_2$  и в смеси  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  наблюдается увеличение стекания жидкого металла. В результате появляются непровары в корне шва, натеки и несплавления по краям шва.

Вследствие этого металл толщиной более 6–8 мм и более сваривают «снизу вверх». Сварку ведут «углом вперед», направляя дугу на переднюю часть ванночки, что уменьшает ее стекание. Металл толщиной более 8 мм сваривают с поперечными колебаниями электрода по треугольнику (см. рис. 4.8, г). Техника выполнения сварки швов «снизу вверх» требует более высокой квалификации сварщика.

Применение импульсно-дуговой сварки в  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  15% проволоками диаметром 1,2–1,6 мм, позволяет сваривать вертикальные швы на металле толщиной до 12 мм «сверху вниз». Сварку выполняют электродом, наклоненным углом назад, швы с катетом до 5 мм сваривают без поперечных колебаний электрода, швы катетом более 5 мм – с поперечными колебаниями электрода и в несколько проходов. Формирование швов хорошее, разбрызгивания изделия нет, можно получить угловые швы с небольшим усилением и ослабленные, что обеспечивает экономию электродной проволоки, электроэнергии и труда, затрачиваемых на сварку 1 п.м шва. Простая техника сварки и мягкая эластичная дуга меньше утомляют сварщика, чем сварка снизу вверх с колебаниями электрода.

Режимы сварки вертикальных швов со свободным формированием в  $\text{CO}_2$  и в смеси  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  (25–80%) выбирают такими, чтобы процесс протекал с частыми короткими замыканиями.

При значительной длине прямолинейные вертикальные швы на стали толщиной 15–40 мм целесообразно сваривать с принудительным формированием порошковой или сплошной проволокой. Для получения высокого качества и хорошего формирования швов необходимо наличие между ползуном и швом небольшого количества шлака. Для этого, при использовании проволок сплошного сечения, в зону сварки подают небольшое количество флюса. При сварке порошковой проволокой шлак образуется при расплавлении самой проволоки. Для защиты зоны сварки применяют  $\text{CO}_2$  или смесь  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  (15–30%). В последнем случае на поверхности ванны образуется больше шлака и металл ванны бо-

лее жидкотекучий. Для получения шва высокого качества необходимо предупредить попадание воздуха к расплавленной ванне. В связи с этим рекомендуют подавать газ по специальным газовым соплам. Наличие на поверхности ванны шлака снижает требования к качеству защиты. Режимы сварки вертикальных швов выбирают, исходя из условия получения заданного термического цикла, получения процесса с минимальным разбрызгиванием и толщины металла. С увеличением сварочного тока увеличиваются объем сварочной ванны и ее глубина. Сварку с принудительным формированием выполняют на режимах без коротких замыканий. Соединения на металле толщиной более 20 мм выполняют с колебаниями электрода. У ползунов электрод задерживают на 1,5–2 с. Сварку вертикальных швов выполняют на постоянном токе. Сварка вертикальных швов в защитных газах с принудительным формированием обеспечивает более высокую производительность, чем сварка со свободным формированием и ручная дуговая сварка. Стыковые соединения под сварку с принудительным формированием собирают без скоса кромок или с V-образной разделкой (рис. 4.9).

Сборка с V-образной разделкой позволяет уменьшить сечение разделки и повысить скорость сварки. Кроме того, при V-образной разделке кромок в случае выхода из строя автомата сварку можно закончить полуавтоматической или ручной дуговой сваркой. Поперечная усадка соединения при V-образной разделке также меньше, чем при прямоугольной. Сборку соединений желательно собирать с учетом усадки.

**Горизонтальные швы** на стали толщиной до 6 мм сваривают в  $\text{CO}_2$  или  $\text{Ar}+(20-25\%)\text{CO}_2$  проволоками диаметром 0,8–1,4 мм. Соединения на металле толщиной до 3 мм собирают без скоса кромок с небольшим зазором, что обеспечивает получение швов с полным проваром и небольшим усилением. Сварку ведут с наклоном электрода снизу вверх и «углом назад», дугу направляют на металлическую ванночку. При толщине металла более 4 мм делают скос на кромке верхнего листа. Сварку выполняют с наклоном электрода поперек шва

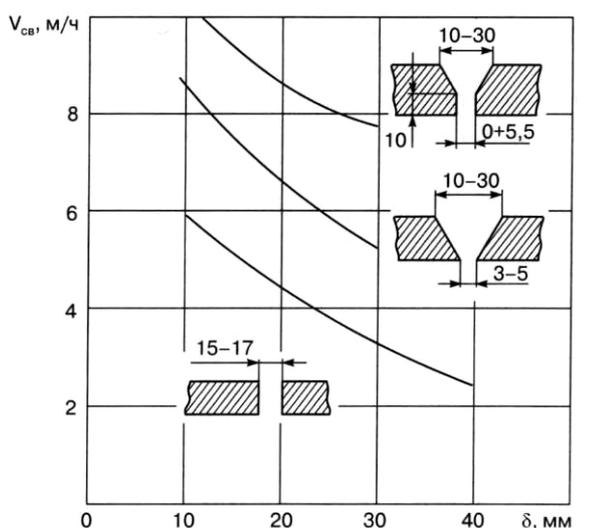


Рис. 4.9. Скорости сварки вертикальных швов, выполняемых в  $\text{CO}_2$  с принудительным формированием в зависимости от разделки кромок

на угол  $40\text{--}60^\circ$  к вертикали (рис. 4.8, д). Основное сечение шва заваривают проволоками сплошного сечения диаметром до 1,4 мм или порошковыми диаметром до 2 мм, а облицовочные швы заваривают проволоками диаметром 1,2–1,4 мм на малых режимах (приложение 1).

При сварке горизонтальных швов проволоками Св-08Г2С диаметром 1,6–2 мм в металле шва встречаются характерные несплавления, имеющие вид полушария. Для их исключения целесообразно понижать режим сварки в  $\text{CO}_2$ , выполнять сварку порошковыми проволоками или импульсно-дуговой сваркой в  $\text{Ar}+15\%\text{CO}_2$ .

**Потолочные швы** рекомендуется сваривать в  $\text{CO}_2$  проволокой диаметром 0,8–1,4 мм на режимах с частыми короткими замыканиями или в  $\text{Ar}+\text{CO}_2(10\text{--}15\%)$  импульсно-дуговой сваркой. Сваривать такие швы полуавтоматом труднее, чем при других положениях швов, поэтому сварщик должен иметь более высокую квалификацию. Сварку потолочных швов ведут углом назад (рис. 4.8, е) на минимальных напряжениях. Сварочный ток можно выбирать несколько большим, чем для сварки вертикальных швов (приложение 1). Дугу и поток  $\text{CO}_2$  направляют на ванну жидкого металла, что уменьшает ее стекание. Для этой же цели рекомендуется увеличивать расход газа. Сварку стыковых швов с разделкой кромок ведут с поперечными колебаниями электрода. Металл толщиной более 6 мм рекомендуется сваривать в два прохода и более, что обеспечивает получение плотных швов.

**Сварку электрозаклепками и точками** применяют для выполнения нахлесточных тавровых, угловых и стыковых соединений на металле толщиной от 0,5 до 16 мм, со швами, расположенными во всех пространственных положениях [5, 19, 97 и др.]. Сварку ведут в  $\text{CO}_2$  или в смесях  $\text{Ar} + \text{CO}_2 25\text{--}80\%$ . При сварке сталей до 10 мм со швами расположенными во всех положениях используют проволоки диаметром до 1,4 мм. При сварке электрозаклепками в металле толщиной более 1,5 мм в вертикальном и потолочном положениях и толщиной более 6 мм в нижнем положении рекомендуется делать отверстия в верхнем листе. Требования к качеству сборки обычно такие же, как при сварке швами большой длины. Стабильность начала процесса оказывает большое влияние на качество сварки точками и электрозаклепками. На глубину проплавления точки наиболее эффективно влияет сварочный ток. С его повышением увеличиваются диаметр и высота усиления точки. Сварку следует выполнять на токе, максимально допустимом для данной толщины металла. Напряжение дуги оказывает влияние на форму точки. При недостаточном напряжении в центре точки образуется углубление, а при завышенном – бугорок. Оптимальное напряжение зависит от сварочного тока и диаметра электрода. При сварке точки глубина проплав-

ления растет в первый период горения дуги. В дальнейшем глубина проплавления растет незначительно, увеличивается только усиление точки. Сварку металла толщиной до 2 мм обычно выполняют без изменения тока в процессе сварки точки. При этом путем выбора напряжения можно получить хорошее формирование точки с достаточной глубиной и шириной проплавления. При большей толщине металла рекомендуется выполнять сварку с изменением тока. После начала сварки точки силу тока увеличивают, а в конце уменьшают и одновременно повышают напряжение. Это обеспечивает глубокое проплавление, хорошую форму электрозаклепки и позволяет регулировать термический цикл при сварке. Для увеличения сечения проплавления и прочности электрозаклепки сварку рекомендуют выполнять с круговым перемещением электрода и делать отверстия в верхнем листе. Поверхность листов в месте расположения электрозаклепочных соединений должна быть очищена на обоих листах. При нарушении газовой защиты, превышении зазоров в соединении и при использовании неочищенной проволоки в электрозаклепках образуются поры. Трещины в электрозаклепках и точках появляются в основном при сварке высокоуглеродистых сталей и при повышенных режимах сварки.

#### **4.4. Особенности приварки болтов и шпилек**

Сварка в  $\text{CO}_2$  и смесях  $\text{Ar}+\text{CO}_2(25-80\%)$  и  $\text{Ar}+\text{O}_2(3-5\%)$  находит применение при приварке болтов и крепежных шпилек для крепления изоляции к корпусам судов и различным емкостям, ошиповке экранных труб котлов, приварке болтов к балкам строительных конструкций для закрепления на них железобетонных перекрытий и др. В монтажных условиях приварка шпилек и болтов производится специальными легкими пистолетами, в которых закрепляют болт или шпильку, подлежащую приварке. Приварка производится путем подачи к месту сварки защитного газа и оплавления болта дугой, которая питается от выпрямителя или от конденсаторной батареи. Варианты техники выполнения приварки показаны на рисунке 4.10. Для надежного зажигания дуги нижний конец болта делают с тонким выступом длиной 1–1,5 мм или скошенным на конус. В начале болт прижимается к изделию. Дуга зажигается путем отрыва болта от изделия (рис. 4.10, *a*) или без отрыва от изделия путем пережигания тонкого выступа болта. После заданного времени горения дуги и оплавления торца болта и изделия болт опускают к оплавленному изделию и выдерживают до затвердевания оплавленной части. При защите углекислым газом надежное оплавления болтов по всему торцу достигается при диаметрах болтов до 10 мм. Для оплавле-

ния по всему торцу и получения надежного соединения болтов больших диаметров (до 30мм) приварку выполняют в смеси Ar+CO<sub>2</sub> 15–25% или Ar+O<sub>2</sub> 3–5% на прямой полярности.

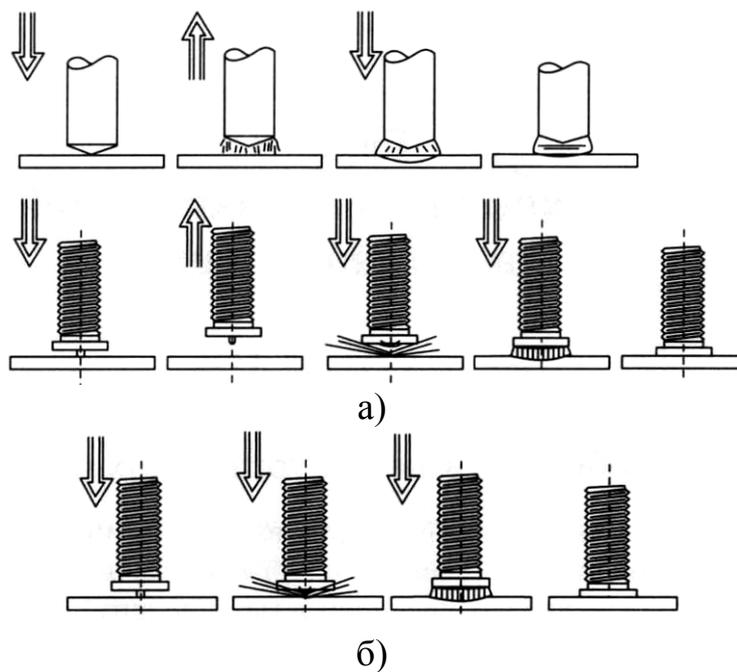


Рис. 4.10. Техника приварки болта при питании от:  
а) выпрямителя; б) конденсаторной батареи

## ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА

### 5.1. Особенности металлургических процессов при сварке сталей

Для получения при сварке в защитных газах углеродистых сталей швов без пор с достаточными механическими свойствами необходима защита расплавленного металла от азота, кислорода и водорода, а также легирование металл шва элементами раскислителями. При сварке в  $\text{CO}_2$  а и его смесях в зоне высоких температур у дуги происходит разложение  $\text{CO}_2$  по реакции:



Степень разложения  $\text{CO}_2$  и соответственно состав газа зависят от температуры. Считают, что средняя температура защитного газа, контактирующего с жидким металлом равна  $\sim 2600$  °С, а газовая фаза состоит из 53,8 об.%  $\text{CO}_2$ , 30,8 об.%  $\text{CO}$  и 15,4 об.%  $\text{O}_2$  [96, 98]. Кислород, соприкасаясь с жидкой каплей и ванной, окисляет углерод и другие элементы, входящие в состав стали, а также растворяется в жидком металле. При сварке углеродистых сталей, окисление углерода и образование газообразной окиси углерода, происходящие при затвердевании шва является одной из основных причин образования пор в шве. Введение в проволоку элементов-раскислителей (кремния, марганца, титана, алюминия) подавляет реакцию окисления углерода и обеспечивает получение плотных швов. В зону сварки попадают также азот и водород. Азот и водород могут попадать с покрытиями и технологическими смазками электродных проволок, в виде примеси с углекислым газом из влаги в баллонах, кислородом или аргоном, из воздуха, подсосываемого из зазоров соединения, при нарушениях защиты зоны сварки и из антикоррозионных покрытий на металле. Водород попадает в зону сварки также из ржавчины на электродной проволоке и свариваемых кромках. Значительное количество азота и водорода может вызвать образование пор в шве и снижение пластических свойств металла и способствовать появлению трещин. Причиной образования пор в этих случаях является скачкообразное уменьшение растворимости азота и водорода в твердой стали по сравнению с жидкой. Состав газа определяется его температурой (рис. 5.1) и составом сварочных материалов.

Кислород окисляет водород, попадающий в зону сварки, и серу, что повышает стойкость металла шва к образованию пор и горячих трещин. При окислении кремния, марганца, титана, алюминия и других составляющих стали образуются окислы. От их состава и количества зависит количество шлаковых включений в металле шва и внешний вид шва. Интенсивность взаимодействия с газами и испарение элементов

протекают наиболее интенсивно в капле на электроде [96]. Состав металла шва можно регулировать путем изменения температуры и размеров капель, длительности взаимодействия металла в дуге. С увеличением тока температура капель повышается. Переход на прямую полярность и уменьшение диаметра электрода приводит к снижению температуры капель. Предварительный подогрев электрода также снижает температуру капель.

Интенсивность реакций и потери элементов из электродного и основного металлов неодинаковы, то состав металла шва зависит от доли участия электродного и основного металлов в металле шва. Разницу в окислении учитывают коэффициентами усвоения соответствующего элемента. Увеличение силы сварочного тока сначала вызывает повышение коэффициентов усвоения элементов из проволоки, а затем небольшое их понижение. При повышении напряжения и диаметра электродной проволоки потери элементов увеличиваются. Состав металла шва определяется также составом защитного газа. Добавление к  $\text{CO}_2$  кислорода, в количестве 15–25 % усиливает интенсивность окисления водорода и повышает стойкость металла шва к образованию пор и трещин. При сварке в смесях  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  окислительная способность смеси примерно в 1,5 раза меньше, чем в  $\text{CO}_2$ .

Режим сварки оказывает влияние на интенсивность металлургических реакций и на доли электродного и основного металла в металле шва. С повышением напряжения потери кремния и марганца увеличиваются [5, 19, 99, 100]. Потери элементов из проволок диаметром 0,8–1,2 мм значительно меньше, чем из проволок диаметром 1,6–2 мм (табл. 5.1) [19].

Результаты экспериментов показывают, что с увеличением сварочного тока возрастает содержание марганца и кремния в металле шва [5, 10, 11, 19, 96, 99].

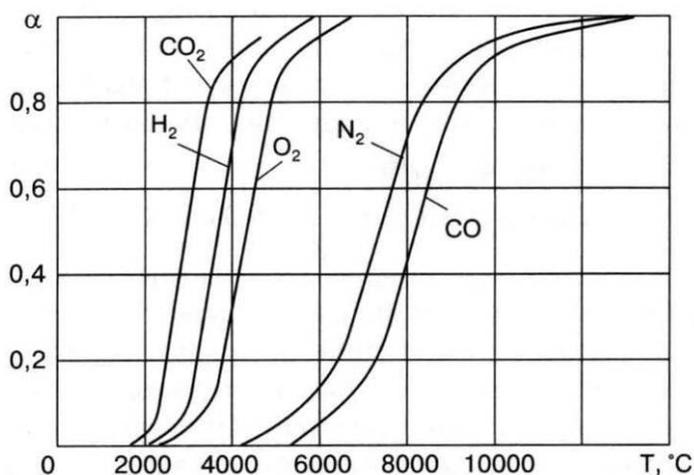
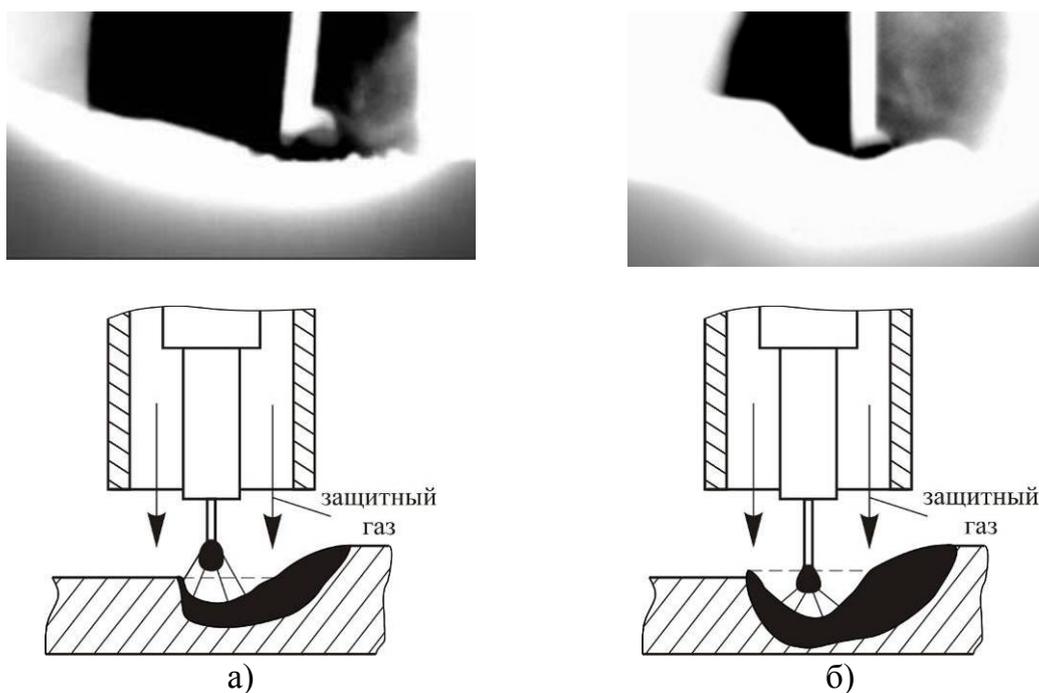


Рис. 5.1. Зависимость степени диссоциации  $\alpha$  газов от температуры  $T$  при атмосферном давлении [98]

Таблица 5.1

*Химический состав проволоки и металла наплавки при сварке в углекислом газе (полярность обратная)*

Исследуемый объект	Сила тока, А	Напряжение, В	Состав, %		
			С	Mn	Si
Проволока диаметром 0,8 мм			0,11	1,1	0,98
Шов	95	17	0,10	0,68	0,63
	95	20	0,09	0,58	0,52
	95	24	0,07	0,41	0,38
	140	20	0,10	0,72	0,63
Проволока диаметром 2 мм			0,1	1,0	0,47
Шов	300	28	0,09	0,68	0,28
	300	35	0,08	0,34	0,10
	400	42	0,09	0,59	0,19



*Рис. 5.2. Формирование капли:  
а) открытая дуга; б) полупогруженная дуга*

Уменьшение содержания марганца и кремния в металле шва наблюдается с увеличением скорости истечения защитного газа  $\text{CO}_2$  при сварке открытой дугой (рис. 5.2, а) проволоками диаметром 1,2мм [10, 11, 96, 99]. Проведенные экспериментальные исследования на много-

слоины сварных образцах из стали 45 с применением разных по составу сварочных проволок (Св-08Г2С, Св-08ГСМТ) подтвердили зависимость содержания марганца и кремния в металле шва от тока сварки (табл. 5.2–5.4).

Полученные результаты отражают влияние сварочного тока и скорости истечения защитного газа на химический состав металла сварных швов и, как следствие, на их эксплуатационные свойства.

Начиная с 250А ( $U = 27В$ ,  $l = 12$  мм), когда дуга становится полупогруженной (рис. 5.2, б), содержание марганца в металле шва практически стабилизируется, причем, на уровне гораздо более высоком, чем в металле шва полученным при сварке открытой дугой (140–220 А).

Таблица 5.2

*Химический состав основного и сварочных материалов*

Наименование материала	Массовая доля элементов, %								
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
По марочнику сталей [101]									
Сталь 45 ГОСТ 1050-88	0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	≤0,04	≤0,035	≤0,25	≤0,3		
Св-08Г2С ГОСТ 2246-70	0,05-0,11	1,8-2,1	0,7-0,95	≤0,025	≤0,03	≤0,2	≤0,25	-	-
Св-08ГСМТ ГОСТ 2246-70	0,08-0,12	1,0-1,3	0,4-0,7	≤0,025	≤0,03	≤0,3	≤0,3	0,2-0,4	0,05-0,12
Осредненные результаты исследований									
Сталь 45	0,44	0,67	0,31	0,049	0,025	0,19	0,11		
Св-08Г2С	0,07	1,80	0,78	0,006	0,020	0,06	0,07	-	-
Св-08ГСМТ	0,12	1,12	0,54	0,022	0,019	0,15	0,14	0,21	0,054

Таблица 5.3

*Осредненные значения результатов исследований химического состава металла шва образцов из стали 45, заваренных проволокой Св-08Г2С в CO<sub>2</sub> ( $U = 27В$ ,  $l = 12$  мм,  $Q = 25$  л/мин,  $V_{св} = 20$  см/мин)*

Сварочный ток, А	Массовая доля элементов, %								
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
Традиционная одноструйная газовая защита									
140	0,120	1,205	0,430	0,012	0,015	0,080	0,100	-	-
190	0,140	1,214	0,450	0,012	0,011	0,090	0,100	-	-
230	0,152	1,264	0,461	0,016	0,014	0,089	0,098	-	-
280	0,150	1,461	0,556	0,019	0,022	0,096	0,104	-	-
Двухструйная газовая защита									
140	0,145	1,066	0,342	0,014	0,015	0,082	0,092	-	-
190	0,133	1,104	0,379	0,018	0,021	0,098	0,103	-	-
230	0,135	1,243	0,444	0,016	0,014	0,080	0,097	-	-
280	0,165	1,363	0,534	0,028	0,031	0,108	0,092	-	-

При сварке открытой дугой с традиционной газовой защитой проволокой Св-08Г2С в диапазоне токов 140–220 А выгорает 30–40 % марганца содержащегося в ней, а при сварке на токах 230–280 А выгорает около 20 % марганца при одинаковом расходе защитного газа (табл. 5.3, рис. 5.3, а). Меньшее выгорание марганца происходит за счет увеличения скорости подачи сварочной проволоки, таким образом, происходит быстрый перенос капли в сварочную ванну и сокращение времени пребывания капли в перегретом состоянии.

При сварке в тех же условиях с двухструйной газовой защитой выгорание марганца увеличивается, примерно, на 10 и 5 процентов соответственно, что свидетельствует о повышенном газодинамическом воздействии на каплю расплавленного металла и более интенсивном протекании металлургических процессов. Аналогичная картина наблюдается и при сварке проволокой Св-08ГСМТ (табл. 5.4, рис. 5.3, б).

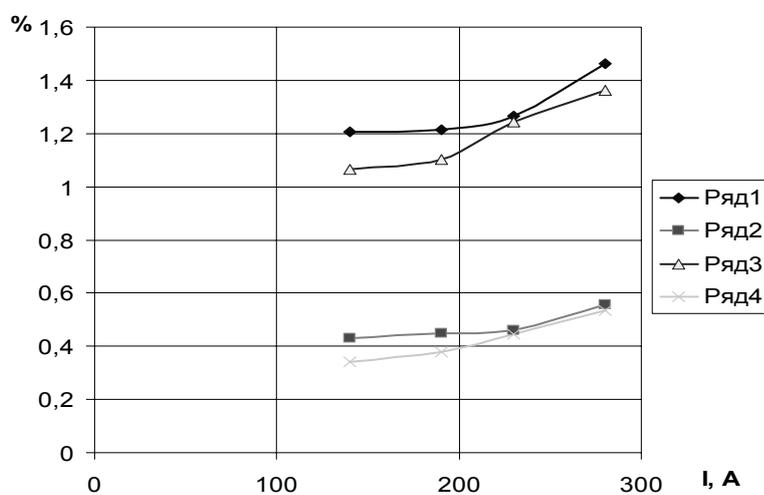
Таблица 5.4

*Осредненные значения результатов исследований химического состава металла шва образцов из стали 45, заваренных проволокой Св-08ГСМТ в CO<sub>2</sub> (U = 27В, l = 12 мм, Q = 25 л/мин, V<sub>св</sub> = 20 см/мин)*

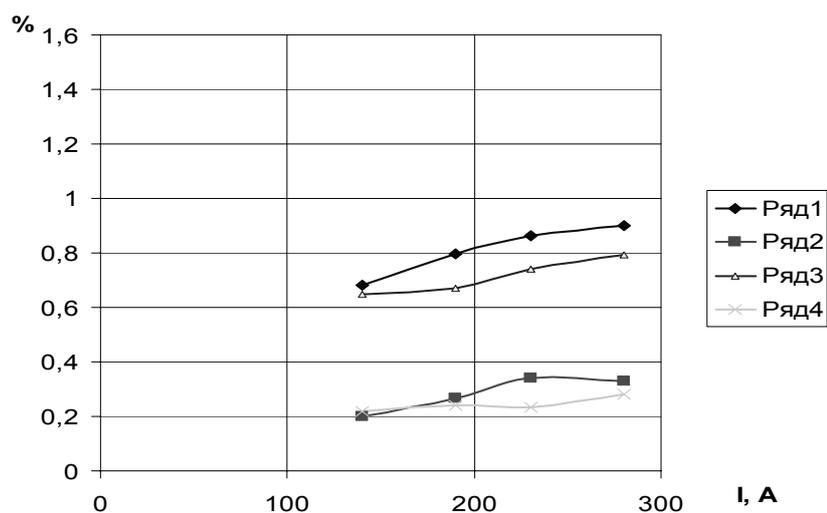
Сварочный ток, А	Массовая доля элементов, %								
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
Традиционная одноструйная газовая защита									
140	0,184	0,682	0,201	0,040	0,036	0,120	0,122	0,16	0,012
190	0,124	0,796	0,268	0,037	0,025	0,130	0,143	0,17	0,017
230	0,136	0,864	0,341	0,031	0,016	0,125	0,126	0,17	0,019
280	0,144	0,901	0,328	0,036	0,029	0,167	0,150	0,17	0,019
Двухструйная газовая защита									
140	0,206	0,652	0,218	0,021	0,037	0,135	0,131	0,16	0,015
190	0,161	0,669	0,239	0,024	0,021	0,126	0,127	0,15	0,01
230	0,151	0,739	0,235	0,035	0,025	0,148	0,137	0,15	0,012
280	0,169	0,792	0,280	0,039	0,018	0,147	0,134	0,15	0,018

При сварке открытой дугой величина сварочного тока и скорость истечения активного защитного газа из сварочного сопла оказывают значительное влияние на химический состав металла сварного шва. В случае сварки полупогруженной и погруженной дугой в кратере сварочной ванны создается самозащитная атмосфера из паров металла и выделяющихся газов, т.е. газокинетические процессы перестают играть значимую роль в управлении переносом капель и химическим составом

металла сварного шва, а защитный газ выполняет только защитную функцию зоны сварки от влияния воздуха.



а)



б)

Рис. 5.3. Зависимость содержания марганца и кремния в металле шва сварных соединений из стали 45:

а) сварка проволокой Св-08Г2С; б) сварка проволокой Св-08ГСМТ.

Традиционная одноструйная газовая защита: ряд1 – Mn, ряд2 – Si;

двухструйная газовая защита: ряд3 – Mn, ряд4 – Si

## 5.2. Технология сварки и наплавки сталей

**Электродная проволока для сварки.** Проволоки, используемые для сварки в  $\text{CO}_2$  и его смесях с Ar и  $\text{O}_2$  углеродистых и легированных сталей изготавливаются по ГОСТ 2246–70 (приложение 2).

Проволоки изготавливают с омедненной и неомедненной поверхностью. В настоящее время на предприятиях используют также электродные проволоки, изготавливаемые в Германии, Италии, Венгрии, Польше и др. странах по нормам DIN 8559 и ISO14341:2002.

В соответствии с ГОСТ 26271–84 изготавливаются порошковые газозащитные проволоки для сварки углеродистых и низколегированных сталей в защитных газах (табл. 5.5). В соответствии ГОСТ 26101–84 изготавливают универсальные порошковые проволоки для наплавки в защитных газах.

Таблица 5.5

*Химический состав некоторых порошковых газозащитных проволок, диаметром 1,0–2,0 мм изготавливаемых серийно*

Марка	Химический состав, %							
	C	Mn	Si	Ti	Ni	Mo	S	P
ППс-ТМВ7	0,05	1,45	0,35	-	-	-	0,015	0,015
ПП-АН63	< 0,12	1,0-1,5	0,3-0,7	-	-	-	< 0,03	< 0,03
ПП-АН67	< 0,10	1,0-1,3	0,35-0,60	Cr 0,25-0,35	1,1-1,25	0,25-0,35	< 0,03	< 0,03
Megafil 710M	0,05	1,3	0,70	0,03	0,2-0,7	-	0,02	0,02
Megafil 710R	0,05	1,3	0,50	0,03	0,7	-	0,02	0,02

**Низкоуглеродистые и низколегированные стали** хорошо свариваются в  $\text{CO}_2$  тонкими проволоками диаметром 0,5–1,6мм, в смесях  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ (15–25%) проволоками диаметром 1,2–2,0мм, в смесях Ar+ $\text{CO}_2$  (до 18%) импульсно-дуговой сваркой, в смесях Ar+ $\text{CO}_2$  (20–25%) и Ar+ $\text{CO}_2$  20%+ $\text{O}_2$  5% на режимах с принудительными короткими замыканиями проволокой 0,5–1,4мм и диаметром 1–4мм на режимах струйного переноса, в смесях Ar+ $\text{CO}_2$  (от 25 до 80%) на режимах с принудительными короткими замыканиями проволокой 0,8–1,4мм. При этом обеспечивается получение высоких механических свойств (табл. 5.6), таких же, как при использовании электродов типов Э50А, Э55. Стойкость швов, вы-

полненных в  $\text{CO}_2$  при динамической нагрузке выше, чем швов, выполненных под флюсом.

При сварке толстого металла в нижнем положении используют проволоки диаметром 1,6 и 2,0 мм Св-08Г2С и Св-08ГСМТ, которые рекомендуется нагревать в течение 1,5–2 ч до температуры 200–250°C для удаления водорода и азота. Механические свойства швов, сваренных в  $\text{CO}_2$  проволоками диаметром 1,6–2,0мм, несколько ниже, чем проволоками диаметром 0,8–1,4мм. Швы, сваренные в смеси  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ , по сравнению со сваркой в  $\text{CO}_2$ , обладают несколько более высокой ударной вязкостью при низких температурах (– 40 °С) (приложение 3). Механические свойства сварных соединений зависят от скорости охлаждения шва. С увеличением скорости охлаждения предел текучести несколько повышается, что связано с измельчением микроструктуры металла шва.

Таблица 5.6

*Механические свойства сварных соединений сваренных в  $\text{CO}_2$  (проволока Св-08Г2С диаметр 0,8–1,4мм, полярность обратная)*

Марка стали	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град	Твердость шва по Виккерсу
СтЗсп	400–450	180	150–300
Ст4С	430–520	180	160–300
09Г2	460–540	180	160–320
СХЛ-4	550–600	180	170–350

При сварке соединений, собранных с неравномерным зазором и при неизбежных нарушениях газовой защиты (сварка на открытых площадках, при значительных зазорах в соединениях и др.) для сварки в  $\text{CO}_2$  углеродистых и низколегированных, сталей рекомендуют проволоку Св-20ГСЮТ.

При сварке в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$  сталей 10ХСНД и 15ХСНД для повышения стойкости сварных соединений к атмосферной коррозии рекомендуют проволоку Св-08Г2СДЮ, а для повышения коррозионной стойкости сварных соединений, эксплуатируемых в морской воде, – проволоку Св-08ХГ2С, а также Св-10ХГ2С дополнительно легированную никелем [5].

Для сварки углеродистых и низколегированных сталей в  $\text{CO}_2$  применяют также порошковые проволоки трубчатой конструкции с сердечником рутилового типа. Эти проволоки обеспечивают значительное уменьшение разбрызгивания и хорошее формирование швов. По механическим свойствам металл шва отвечает требованиям, предъяв-

ляемым к электродам типа Э50А. Порошковые проволоки с сердечником основного типа обеспечивают получение швов с более высокими пластическими свойствами при низких температурах.

Для сварки в  $\text{CO}_2$  углеродистых и ряда низколегированных сталей разработаны и изготавливаются проволоки типа Megafil 710 (табл. 5.5), которые содержат в центре небольшое количество шлака рутилового типа. Эти проволоки обеспечивают уменьшение разбрызгивания в диапазоне больших сварочных токов (выше 370 А) и хорошее формирование шва [6, 97]. Однако на поверхности шва образуется значительное количество шлака.

Сварка углеродистых и низколегированных сталей успешно выполняется также в  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ . Более высокий окислительный потенциал этой смеси обеспечивает большее окисление элементов; в том числе и водорода, что повышает стойкость швов к образованию трещин. Для сварки в смеси  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  используются проволоки Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ (с церием) [97]. Сварку среднелегированных конструкционных сталей (20ХГС, 25ХГС, 30ХГС, 30ХГСА) рекомендуется выполнять в  $\text{CO}_2$  и смесях  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  и  $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$  [5, 99]. В зависимости от состава стали и режима сварки применяют проволоку Св-08Г2С, а в случае наличия в стали значительного количества марганца – проволоку Св-08ГС. Смесь  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  обеспечивает повышение хладноломкости швов, снижение количества шлака на швах и резкое уменьшение разбрызгивания [102, 103]. Сталь 20ХГС сваривается удовлетворительно, сталь 30ХГС сваривается с некоторыми затруднениями. Сталь 30ХГСА толщиной до 4 мм сваривают в  $\text{CO}_2$  без разделки кромок за один проход; при этом шов легируется углеродом, марганцем, кремнием и хромом за счет основного металла. Поэтому для сварки используют проволоки Св-08ГСМ, Св-08ГСМТ, Св-08ХГ2С, Св-08ХГ2СМ, Св-18ХГС диаметром 0,8–1,4 мм с содержанием не более 0,18 %С. Режимы сварки выбирают обычно такие же, как и для низколегированных сталей. Металл толщиной более 4 мм сваривают с разделкой кромки за несколько проходов. Для сварки сталей 30ХГС и 30ХГСА используют проволоку Св-08ХЗГ2СМ, которая обеспечивает получение высоких механических свойств после термической обработки. Металл толщиной до 10 мм сваривают без предварительного подогрева, а более 10 мм с предварительным подогревом. Первый корневой шов можно сваривать проволоками Св-08Г2С, Св-10ГСМТ, Св-08Г2СМ диаметром 1,0–1,2 мм. Стали 15ХМА и 20ХМА используют для конструкций, работающих при температуре до 520 °С. Сваривать их рекомендуется проволокой Св-08ХГСМ с предварительным подогревом до температуры 250–300 °С. После сварки соединения подвергают высокому отпуску. Сталь 34ХМ и

соединения ее со сталью 20ХЗМВФ рекомендуют сваривать проволокой Св-08ХГСМФ с предварительным и сопутствующим подогрегом до температуры 350 °С. После сварки соединение подвергают термической обработке.

Сварка среднеуглеродистых и особенно высокоуглеродистых сталей затруднена ввиду опасности образования трещин в швах и в зоне термического проволоками влияния. Для получения высококачественных швов применяют предварительный подогрев изделий и последующую термическую обработку. В CO<sub>2</sub>, Ar+CO<sub>2</sub>, Ar+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> и Ar+O<sub>2</sub> диаметром 1–1,4мм эти стали свариваются легче, чем под флюсом. Это можно объяснить как окислительным характером защитного газа, так и меньшими напряжениями при сварке. Добавка кислорода и сварка в смесях Ar+CO<sub>2</sub> 20%+O<sub>2</sub> 5% на режимах с принудительными короткими замыканиями проволокой 0,5–1,4мм повышает стойкость к образованию пор и трещин.

### **5.3. Технология сварки, наплавки, и ремонта изделий из чугуна**

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 [6, 98, 104, 105]. При сварке на токах 50–100А и напряжении 18–20В металл шва имеет феррито-перлитно-сорбитную структуру. Зона термического влияния и сплавления имеет трооститно-мартенситную 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 и металле шва и возможно образование трещин. Для уменьшения доли основного металла в металле шва сварку 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 феррито-перлитную

структуру без заметных изменений структуры в зоне термического влияния.

По данным Ф.И. Петренко, при наплавке проволокой Нп-30ХГСА на высокопрочный чугун металл шва состоит из тростита, мартенсита и остаточного аустенита. Твердость металла значительно выше, чем в первом случае. Сварку чугуна со стальными деталями выполняют порошковыми проволоками и реже проволокой Св-08Г2С диаметром 0,8–1,2 мм. Режимы сварки выбирают из тех же соображений, что и при сварке чугуна. При сварке стальных и чугунных деталей встык и внахлестку сварку часто выполняют с облицовкой чугуна путем наплавки его кромок проволокой Св-08ГС или Св-08Г2С. При выполнении основного шва улучшается структура облицовочного слоя и зоны термического влияния в чугуне.

Сварка в  $\text{CO}_2$  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, в сантехнике при сварке труб из серого чугуна [5, 6, 106]. Для холодной сварки серого чугуна в ИЭС им. Е. О. Патона разработана порошковая проволока ППЧ-1, имеющая состав: 7,0–7,5% С; 4,0–4,5% Si; 0,4–0,8% Mn; 0,4–0,6% Ti и 0,6–0,9% Al. Данная проволока с учетом окисления элементов и разбавления основным металлом ( $\gamma = 45 \div 60\%$ ) при сварке со средней силой тока [106] обеспечивает получение наплавленного металла и зоны сплавления без отбела и трещин. Структура металла шва феррит с точечным и розеточным эвтектическим графитом. Механические свойства металла шва близки к основному металлу. Использование в качестве защиты углекислого газа обеспечивает малое содержание в шве водорода и малую склонность металла шва к образованию пор.

#### **5.4. Сварка нержавеющей и кислотостойких сталей**

**Сварку нержавеющей высокохромистых сталей** выполняют в смесях аргона с  $\text{O}_2$  или с  $\text{CO}_2$  [5, 6, 103]. При сварке этих сталей в зоне термического влияния наблюдается рост зерен и образование закаленного участка, обладающего высокой твердостью и хрупкостью. Стали 08Х13 толщиной до 16–20 мм, 12Х13 до 12 мм и Х13 до 10 мм при малой жесткости соединений сваривают без предварительного и сопутствующего подогрева. При сварке сталей 08Х13 и 12Х13 проволоками Св-10Х13 и Св-06Х14 металл шва обладает высокой прочностью и хрупкостью. Для снижения прочности и повышения ударной вязкости

до значений, близких к основному металлу, необходим отпуск при температуре 700 °С. В случае невозможности выполнить термическую обработку после сварки сталь 08X13 рекомендуется сваривать проволоками аустенитного класса Св-06X25Н12ТЮ, Св-13X25Н18 и др., обеспечивающими получение аустенитно-ферритных швов, обладающих высокой пластичностью. Сварные соединения на сталях 12X13 и 20X13 требуют обязательного высокого отпуска сразу же после сварки. При сварке стали 20X13 толщиной 10–12 мм без предварительного подогрева, рекомендуют использовать проволоку Св-08X14ГТ, которая снижает вероятность холодных трещин в шве, и обеспечивает удовлетворительные механические свойства сварного соединения после высокого отпуска. Сталь 1X17Н2 толщиной до 8,0 мм можно сваривать без предварительного подогрева. В случае, когда сварные соединения не подвергаются действию кислот, то для сварки можно использовать проволоки Св-10X13 и Св-06X14, которые после отпуска при 700 °С в течение трех часов обеспечивают получение швов, близких по механическим свойствам к основному металлу. При сварке жестких соединений во избежание образования трещин в кратерах требуется их полная заварка. Если соединения на стали 1X17Н2 подвергаются действию кислот, то для сварки рекомендуется использовать проволоку Св-08X18Н2ГТ. После отпуска при 700 °С сварные соединения обладают вполне удовлетворительными механическими свойствами. Аустенитные проволоки при сварке стали 1X17Н2 не обеспечивают необходимых прочностных и пластических свойств шва, поэтому эти проволоки могут быть использованы только в тех случаях, когда соединения не испытывают значительных нагрузок.

Кислотостойкую сталь 1X17 рекомендуется сваривать аустенитными проволоками типов Х20Н15, Св-06X25Н12ТЮ и которые обеспечивают получение металла шва с удовлетворительными механическими свойствами. После сварки требуется отпуск при 760 °С. Для сварки соединений, работающих в кислотах, рекомендуется использовать проволоку Св-06X25Н12ТЮ.

**Сварка кислотостойких хромоникелевых сталей [5, 6, 106]** Использование активных защитных газов ( $\text{Ar}+\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ , и  $\text{CO}_2$ ) обеспечивает окисление водорода, серы и фосфора. В результате повышается стойкость швов против образования горячих трещин. Помимо этого содержание силикатных включений в швах меньше, чем при сварке под флюсом и ручной дуговой сварке. Недостатком сварки в активных газах является повышенная потеря Ti и снижение коррозионной стойкости, а также образование на поверхности швов трудноудаляемой окисной пленки. Одним из способов предотвращения образования пленки явля-

ется подача небольшого количества флюса. Флюс, расплавляясь, покрывает тонким слоем шов и защищает его от окисления.

При сварке конструкций однопроходными швами из стали X18H9T малых толщин, предназначенных для работы в слабоагрессивных средах и в атмосферных условиях, можно использовать проволоки Св-06X19H9T и Св-08X20H9Г7Т. Металл шва имеет дезориентированную аустенитно-ферритную микроструктуру (рис. 5.4), удовлетворительные механические свойства и достаточно высокую стойкость против общей и межкристаллитной коррозии [5, 6]. Состав металла шва зависит как от рода активного газа, так и от состава электродной проволоки (табл. 5.7).

Таблица 5.7

*Химический состав металла сварного соединения на стали X18H9T, сваренного в различных активных газах*

Объект исследования	Защитный газ	Химический состав, %					
		C	Mn	SI	Cr	Ni	Ti
Св-06X19H9T	–	0,08	0,99	0,59	18,5	9,60	0,55
Сталь X18H9T	–	0,09	0,90	0,50	18,0	10,21	0,50
Шов	Ar	0,08	0,95	0,54	18,2	9,83	0,48
	Ar+1%CO <sub>2</sub>	0,08	0,93	0,51	18,2	9,82	0,42
	Ar+5%CO <sub>2</sub>	0,08	0,92	0,48	18,2	9,83	0,38
	Ar+20%CO <sub>2</sub>	0,09	0,91	0,47	18,3	9,88	0,368
	CO <sub>2</sub>	0,09	0,87	0,45	18,4	10,10	0,26

*Примечание: постоянный ток, обратная полярность, I<sub>св</sub> = 230–280 А, U<sub>св</sub> = 25–27 В, V<sub>св</sub> = 25 м/ч, расход газа 12 л/мин.*

Потеря титана бывает наименьшей при сварке в смеси Ar+1%O<sub>2</sub>. С увеличением кислорода, а также добавлением CO<sub>2</sub> потери титана увеличиваются. При сварке в чистом углекислом газе потери титана максимальны. Содержание углерода в шве при сварке в углекислом газе зависит от его содержания в проволоке. Так, при содержании в проволоке 0,03–0,07 %C содержание его в шве увеличивается примерно до 0,08–0,12%. При содержании углерода в проволоке 0,08–0,10%С содержание его в шве остается постоянным. При содержании в проволоке более 0,12–0,14%С наблюдается снижение содержания углерода.

Для сварки в углекислом газе и смесях Ar+O<sub>2</sub> и Ar+CO<sub>2</sub> сталей X18H9, X21H6, X17H5Г9 и X17H4Г9 рекомендуют использовать электродные проволоки Св-08X20H9С2БТЮ и Св-07X18H9ТЮ. Для сварки

сталей X21H6M2T и X17H13M2T рекомендуют проволоки Св-06X19H10M3T и Св-06X20H10M3ТБ. Для сварки сталей X14Г14Н, X14Г14НЗТ, X17АГ14 необходимы проволоки, идентичные по химическому составу свариваемой стали. При выборе активного газа следует стремиться к получению минимального разбрызгивания. Для этого следует выполнять сварку в смесях  $Ar+O_2$ ,  $Ar+15\%CO_2$ . Тонкий металл, вертикальные и потолочные швы рекомендуется выполнять импульсно-дуговой сваркой.

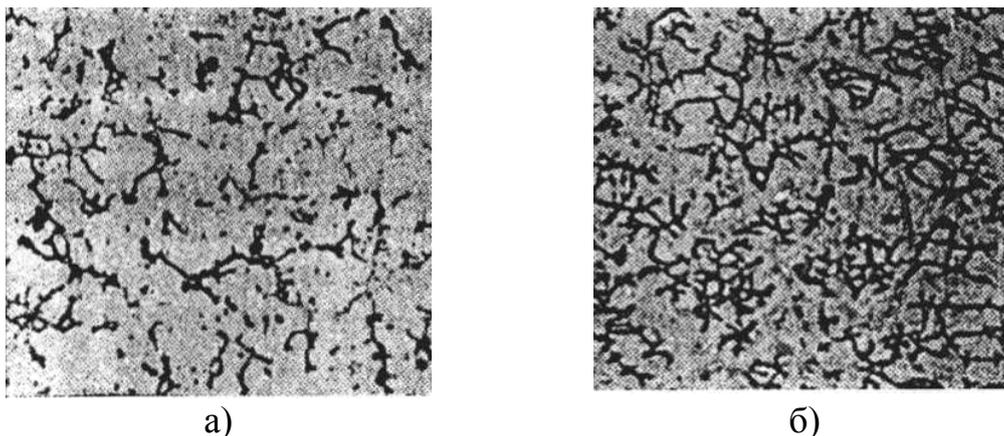


Рис. 5.4. Микроструктура металла шва ( $\times 130$ ) на стали 1X18H9T,  $b=3$  мм, сваренного в  $CO_2$  проволокой диаметром 2 мм:  
а) Св-06X19H9T; б) Св-08X20H9Г7T

**Сварка оцинкованной стали.** Оцинкованный металл применяется для изготовления систем вентиляции, контейнеров, кузовов автомобилей и др. изделий, большей частью малых толщин. Толщина слоя цинка на металле колеблется, обычно, в пределах от 3 до 150 мкм. Сварка оцинкованной стали сопряжена с выгоранием цинка и выделением токсичных газов. Значительное попадание цинка в сварочную ванну приводит к образованию пор и трещин. Для предупреждения попадания цинка в шов обычно производят его удаление механическим путем или выжиганием газовой горелкой. Сварка в защитных газах тонкими проволоками, обеспечивая малую зону разогрева, позволяет сваривать оцинкованный металл без удаления слоя цинка. На практике применяются два способа сварки оцинкованной стали в защитных газах: сварка в  $CO_2$  проволоками типа Св-08ГС и Св-08Г2С диаметром 0,8–1,2мм или порошковой проволокой типа Megafil диаметром 1,0–1,2мм и сварка бронзовыми проволоками типа МНЖКТ, Св-БрКМц3-1или GS-CuSi3 по DIN1733 в  $Ar+1\%O_2$ ,  $Ar+He$  или в  $Ar$ . Сварку в  $CO_2$  выполняют на пониженных напряжениях с частыми короткими замыканиями на малом токе при питании от выпрямителей с повышенными скоростями

нарастания тока короткого замыкания. Технология сварки обеспечивает малую зону разогрева и малое выгорание цинка, и незначительные деформации тонколистовых конструкций.

Применение бронзовых проволок, имеющих малую температуру плавления (910–1025 °С) при дуговой сварке обеспечивает расплавление проволоки без расплавления кромок стальных листов. Такой процесс является дуговой пайкой. Расплавившаяся проволока сплавляется с цинком и не повреждает защитное покрытие. Механические свойства соединения такие же, как паянного соединения. Для уменьшения теплового воздействия и разогрева изделия рекомендуется сварка с пульсирующей подачей проволоки и отрывом электрода [8].

## ГЛАВА 6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Для реализации процессов сварки в защитных газах применяется оборудование, включающее:

- источник питания;
- подающий механизм (полуавтомат или автомат, в зависимости от уровня механизации технологического процесса);
- газовую аппаратуру, включающую редукторы, баллоны, шланги, расходомеры и т.п.

Источник питания является одним из основных элементов сварочного поста, поскольку он обеспечивает, не только питание дуги для поддержания ее устойчивости, но в значительной мере обеспечивает определенную программу изменения мгновенной мощности на этапах плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну.

В зависимости от характера среды, в которой происходит дуговой разряд, существуют следующие виды сварочной дуги [107]:

а) открытая дуга, горящая на воздухе с примесью паров материалов электрода и свариваемого металла, а также веществ компонентов самозащитной порошковой проволоки;

б) защитная дуга, горящая в защитных газах (аргон, гелий, углекислый газ и различные смеси), защищающих расплавленный металл от непосредственного воздействия воздуха.

По роду тока различают дуги переменного и постоянного тока. В зависимости от материала и физического состояния электрода бывают дуги с плавящимся металлическим и неплавящимся (угольные, вольфрамовые, керамические и др.) электродами.

По характеру воздействия дуги как источника теплоты на свариваемый металл различают дуги прямого и косвенного действия.

При сварке дугой прямого действия, иногда называемой зависимой дугой, последняя горит между электродом и свариваемым изделием, которое включено в электрическую сварочную цепь.

При сварке дугой косвенного действия (независимой дугой) изделие не включено в сварочную цепь, а дуга горит между двумя чаще всего неплавящимися электродами.

В соответствии с указанными выше разновидностями электрической дуги можно выделить следующие основные виды дуговой электрической сварки в защитных газах:

1. Дуговая электрическая сварка открытой дугой порошковой проволокой.
2. Дуговая электрическая сварка плавящимся электродом в среде защитных газов (инертных и активных).

Исходя из конкретных требований и степени автоматизации процесса применяется тот или иной способ сварки и соответствующий ему источник постоянного тока.

В процессе сварки в энергетической системе *источник питания – сварочная дуга – ванна* возникают возмущения, причинами которых являются изменения длины дуги, колебания напряжения сети, изменения скорости подачи электродной проволоки, а также изменения физических условий в разрядном промежутке. При возмущениях изменяются напряжение на дуге и сварочный ток, что приводит к нарушению установившегося процесса сварки. Это отражается на глубине проплавления, геометрических размерах шва и структуре металла сварного соединения.

Имеется два состояния работы энергетической системы *источник питания – сварочная дуга – ванна*:

а) Состояние установившегося равновесия или работа в статическом режиме, когда напряжение и ток в системе в течение достаточно длительного времени не изменяют своей величины. Зависимости между напряжением и током дуги или источника ее питания в установившемся состоянии называют статической характеристикой дуги и внешней характеристикой источника питания.

б) Состояние неустановившегося равновесия или работа в переходном режиме, когда ток и напряжение в системе изменяют свою величину под влиянием внешних воздействий на систему или в результате изменения каких-либо ее параметров. Зависимость между напряжением и током дуги или источника питания в неустановившемся режиме называется динамической характеристикой.

**Статическая характеристика дуги**  $U_d = f(I_d)$  определяется свойствами дуги как нелинейного элемента электрической цепи, сопротивление которого зависит от тока.

**Динамическая вольтамперная характеристика** дуги строится по данным осциллограмм. Форма динамической вольтамперной характеристики определяется в основном свойствами источника питания. Так, если сварочная дуга при одинаковых статических вольтамперных характеристиках питается от источников с различными свойствами, ее динамические вольтамперные характеристики будут различными.

Общий вид  $U$ -образной статической характеристики дуги для широкого диапазона изменения сварочного тока изображен на рисунке 6.1. Статическая характеристика дуги может быть возрастающей в случае высокой плотности тока в электроде, например, при сварке в среде защитных газов плавящимся электродом малого диаметра ( $d_e \leq 2$  мм).

**Устойчивость энергетической системы источник питания – сварочная дуга – ванна.** Работа энергетической системы *источник питания – сварочная дуга – ванна* протекает устойчиво, если источник доставляет достаточное количество энергии для процесса сварки и покрытия потерь в системе. Возникающие при горении дуги возмущения нарушают устойчивое состояние системы и вызывают переходные процессы, характер и скорость протекания которых связаны с энергией, накопленной в магнитных и электрических полях системы, а также энергией, переходящей в тепло. Если после прекращения действия возмущения система возвращается в равновесное состояние, то равновесие является устойчивым, если не возвращается – неустойчивым. При возвращении системы после окончания действия возмущения в состояние равновесия могут наблюдаться отклонения от величин, характеризующих режим сварки (тока, напряжения). Если при наличии этих отклонений качество сварного соединения остается в допустимых пределах, то свойства энергетической системы признают удовлетворительными.

Современная сварочная техника использует для питания дуги кроме хорошо известных источников питания (выпрямителей, коллекторных генераторов постоянного тока) источники нового типа, имеющие корректирующие обратные связи по энергетическим параметрам (ток, напряжение), предназначенные для создания условий устойчивого горения дуги и поддержания установленного режима.

**Устойчивость горения сварочной дуги при малых отклонениях напряжения на дуге.** Влияние формы внешней статической характеристики источника и формы статической вольтамперной характеристики дуги на устойчивость горения дуги впервые было показано в исследованиях Кауфмана (1900 г.), который установил, что дуга постоянного тока данной длины с падающей вольтамперной характеристикой при малых токах, переходящей в пологопадающую горит устойчиво при питании от генератора с постоянным выходным напряжением лишь в том случае, когда последовательно с дугой включено определенной величины добавочное сопротивление  $R$ . Условие устойчивого горения дуги было записано в форме следующего неравенства:

$$dU_0/dI + R > 0 \quad (6.1)$$

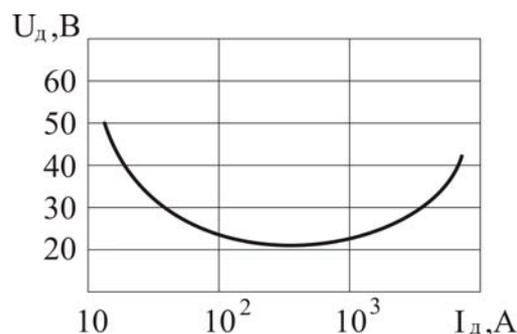


Рис. 6.1. Статическая вольтамперная характеристика дуги

Установившийся режим системы, состоящей из источника питания и потребителя энергии – сварочной дуги, определяется равенством напряжений и токов в них. Следовательно, в установившемся состоянии

$$U_{др} = U_{ир} = U, \quad I_{др} = I_{ир} = I_p \quad (6.2)$$

где  $U_{др}$ ,  $U_{ир}$  – соответственно напряжение дуги и источника питания при установившемся рабочем режиме;  $I_{др}$ ,  $I_{ир}$  – соответственно токи дуги и источника питания в установившемся рабочем режиме.

На рис. 6.2 изображены внешняя характеристика источника питания (кривая 1) и статическая характеристика дуги  $U_d = f_1(I)$  (кривая 2).

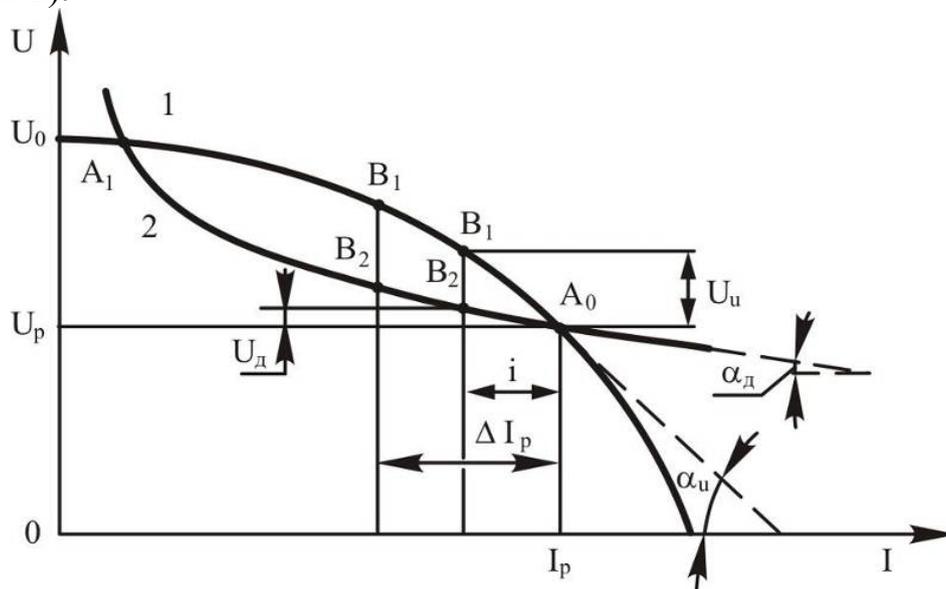


Рис. 6.2. Внешняя характеристика источника питания (кривая 1) и статическая характеристика дуги (кривая 2)

Как видно из рис. 6.2, установившееся состояние системы определяется точками пересечения этих характеристик  $A_0$  и  $A_1$ , удовлетворяющих уравнениям (6.2).

Уравнение динамического равновесия такой системы имеет вид

$$U_u(I) = U_d(I) + L_c \frac{dI}{dt} \quad (6.3)$$

Основным условием статической устойчивости системы является соотношение

$$K_y = \left( \frac{dU_\delta}{dI} - \frac{dU_u}{dI} \right) > 0 \quad (6.4)$$

Таким образом, основное уравнение устойчивости может быть сформулировано в следующем виде: коэффициент устойчивости системы при дуговой сварке  $K_y$ , равный разности производных напряжений статических характеристик дуги и источника питания в рабочей точке, должен быть положительным.

Значение производной  $dU_\delta/dI$ , отображающей связь между мгновенными значениями напряжения и тока в процессе их изменения в нелинейных элементах, называется динамическим сопротивлением элемента, а соотношение  $U/I$ , отображающее связь между этими же величинами в установившемся состоянии, принято называть эквивалентным сопротивлением элемента. Динамические и эквивалентные сопротивления нелинейных элементов являются функциями тока и напряжения.

Исходя из этих понятий, значение производной  $dU_\delta/dI$  может быть названо динамическим сопротивлением дуги и соответственно значение производной  $dU_u/dI$  – динамическим сопротивлением источника питания. В соответствии с этим коэффициент устойчивости,  $K_y$ , является динамическим сопротивлением всей системы, состоящей из источника питания и сварочной дуги.

Следовательно, с учетом указанных понятий условие устойчивости может быть сформулировано в несколько ином виде: система будет статически устойчивой, если динамическое сопротивление ее  $K_y$ , называемое коэффициентом устойчивости, будет положительным.

Как видно из уравнения (6.4), выполнение условия  $K_y > 0$  зависит от соответствия формы внешней характеристики источника питания заданной форме статической характеристики дуги.

Внешняя характеристика источника питания, как и характеристика дуги, может быть падающей, абсолютно жесткой или возрастающей. В первом случае напряжение на нагрузке (дуге) снижается с увеличением тока, во втором оно практически не зависит от величины тока нагрузки. Наконец, при возрастающей характеристике напряжение на нагрузке возрастает с увеличением тока.

Форма характеристик (падающая, абсолютно жесткая или возрастающая) определяется знаком производной, а крутизна возрастания или падения характеристики – углом  $\alpha_d$  (рис. 6.2).

При падающей статической характеристике дуги, когда динамическое сопротивление дуги отрицательно, т.е.  $dU_\delta/dI > 0$ , для соблюдения условия  $K_y > 0$  внешняя характеристика источника питания в рабо-

чей точке должна быть более круто падающей, чем статическая характеристика дуги, т.е.

$$\left| \frac{dU_u}{dI} \right| > \left| \frac{dU_d}{dI} \right|, \quad (6.5)$$

Для соблюдения условия устойчивости  $K_y > 0$  производная  $dU_u/dI$  должна быть отрицательной, т. е. внешняя характеристика источника питания и в этом случае должна быть падающей, но крутизна ее может быть значительно меньшей, чем в случае  $dU_d/dI < 0$ .

Для возрастающей характеристики дуги динамическое сопротивление дуги положительно  $dU_d/dI > 0$ . В этом случае коэффициент устойчивости  $K_y$  может быть положительным при абсолютно жесткой внешней характеристике источника питания, когда  $dU_u/dI = 0$ .

**Технологические свойства источников питания.** Для получения качественного сварного соединения, источники питания дуги должны обладать требуемыми свойствами. Источник питания должен быть рассчитан на конкретные режимы работы, т.е. на определенную нагрузку и определенные условия эксплуатации (температуру, влажность, давление, пространственное положение сварочного шва), при которых все его свойства проявляются оптимально.

Таким образом, источник питания должен удовлетворять двум группам требований: технологическим и технико-экономическим.

**Технологические требования** определяются техническими возможностями достижения технологических свойств, которые определяются, в свою очередь, статическими и динамическими свойствами источника питания и свойствами нелинейных участков цепи – разрядного промежутка и ванны.

Статические свойства источника отражены в его внешней статической характеристике, а способность энергетической системы *источник–дуга–ванна* поддерживать устойчивой горение дуги и заданный режим, зависит от видов и взаимного расположения этих характеристик.

О динамических свойствах источника можно судить по характеру и скорости протекания переходных процессов в системе источник–дуга–ванна, сопровождающихся резкими изменениями сварочного тока при ступенчатых изменениях проводимости разрядного промежутка, которые вызываются резкими переходами из одного установившегося режима в другой. Кроме того, при сварке могут наблюдаться относительно небольшие колебания напряжения на дуге и тока дуги, вызываемые процессами в разрядном промежутке.

**Технико-экономические показатели.** К этим показателям относятся коэффициент полезного действия (к.п.д.), коэффициент мощности ( $\cos\phi$ ), габаритные размеры, масса, показатели надежности, экономические и технологические показатели конструкции источников, соответствие правилам безопасности и т.п.

Различают три режима работы источников питания для дуговой сварки:

1. Продолжительный.
2. Перемежающийся.
3. Повторно-кратковременный.

**Продолжительным режимом** называется такой режим, при котором источник питания успевает за время работы нагреться до температуры  $T_y$  (рис. 6.3).

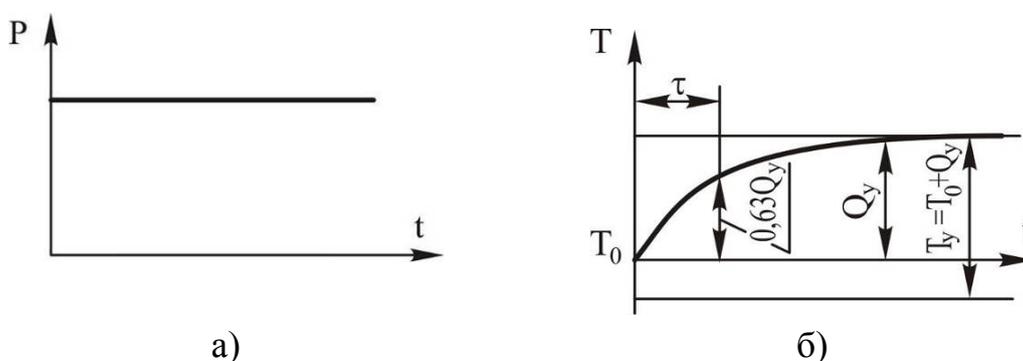
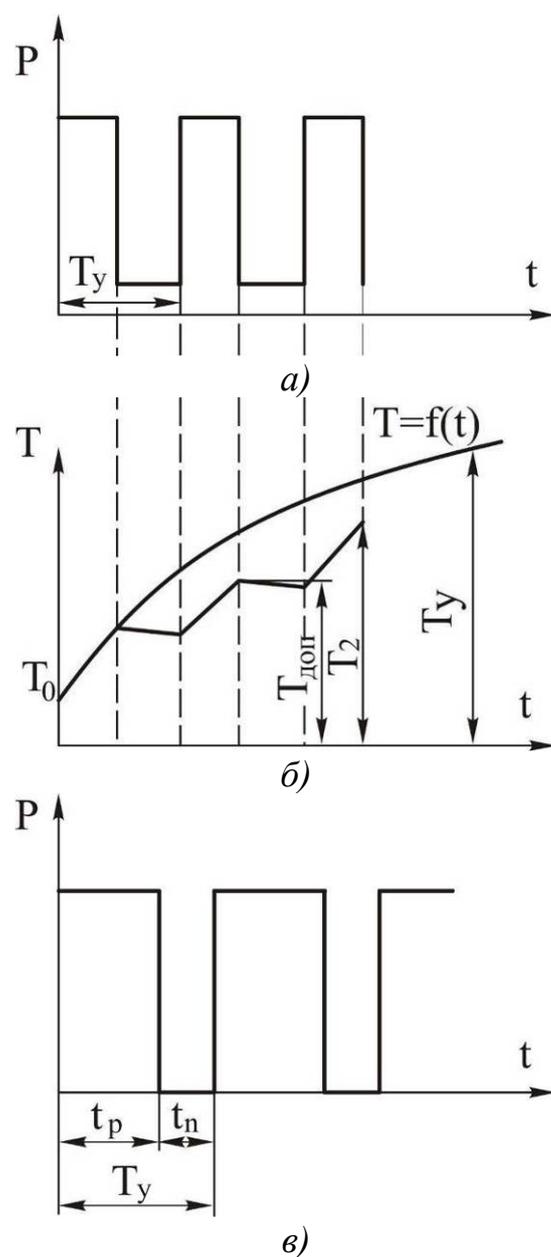


Рис. 6.3. Характеристики продолжительного режима работы источника питания: а) изменение нагрузки во времени; б) нарастание температуры

**Перемежающийся режим** характерен тем, что время  $t_p$  работы сварки чередуется со временем пауз в работе  $t_n$  (рис. 6.4). При этом режиме за время работы  $t_p$  температура источника не успевает достигнуть значения установившейся температуры  $T_y$ , а за время перерывов в работе  $t_n$  источник не успевает охладиться до температуры окружающей среды  $T_0$ . Процесс охлаждения, так же как и процесс нагрева описывается экспоненциальной кривой. По истечении некоторого промежутка времени температура источника колеблется между некоторым максимальным значением  $T_2$  и минимальным  $T_1$ . Среднее значение этих температур обычно выбирается как расчетное  $T_{\text{доп}}$ .

Перемежающийся режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки за время цикла  $t_u = t_p + t_n$ :

$$ПН\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \times 100. \quad (6.6)$$



*Рис. 6.4. Характеристики перемежающегося и повторно-кратковременного режима работы источника питания*

Длительность цикла работы источников, предназначенных для ручной дуговой сварки, имеющих перемежающийся и повторно-кратковременный режимы, принята равной 5 минутам, а источников для механизированной сварки и универсальных – 10 минут.

Начиная с 1974 г. для электросварочного оборудования, выпускаемого промышленностью, принята система обозначений типов, описываемая структурой, приведенной на рисунке 6.5.

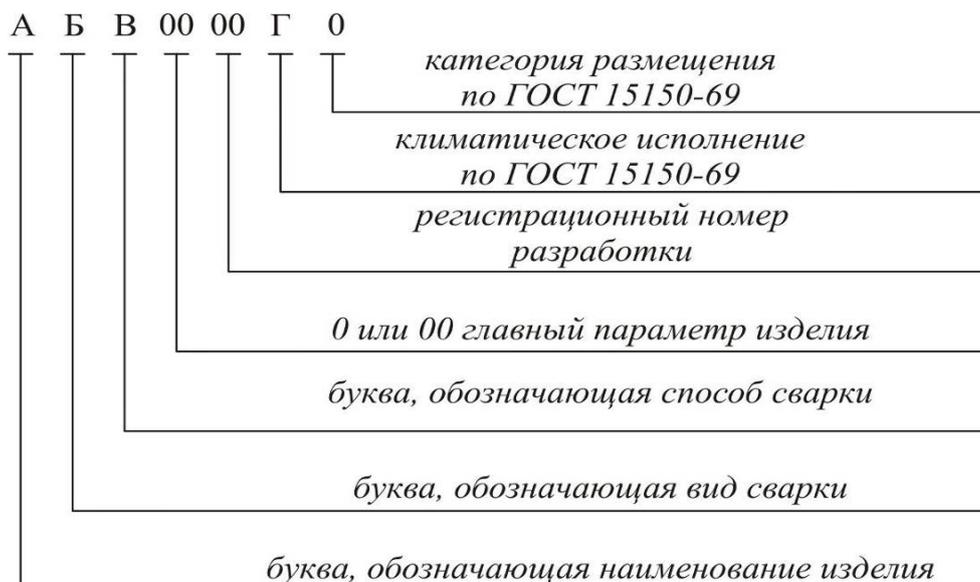


Рис. 6.5. Структура условных обозначений сварочных источников питания

**Классификация источников питания.** Источники питания можно классифицировать по различным признакам в зависимости от поставленных задач:

- по роду тока – на источники постоянного и переменного тока;
- по виду внешних характеристик – на имеющие падающие, полугопадающие, жесткие и положовозрастающие характеристики;
- по способу получения энергии – на зависимые и независимые (или зависимые и автономные), т.е. получающие энергию от стационарной электрической сети или от двигателя внутреннего сгорания;
- по количеству обслуживаемых постов – на однопостовые и многопостовые;
- по применению – на общепромышленные и специализированные.

### 6.1. Традиционные источники питания для дуговой сварки в защитных газах

Выпрямители для дуговой сварки имеют общие элементы: трансформатор, выпрямительный блок, пускорегулирующую, измерительную и защитную аппаратуру.

Наиболее рациональным в выпрямителях для дуговой сварки оказалось применение трехфазного тока. Поэтому для питания выпрямительных блоков обычно используют понижающие трехфазные транс-

форматоры. Внешняя вольтамперная характеристика многих выпрямителей определяется вольтамперной характеристикой трансформатора. В выпрямителях с жесткой (пологопадающей) внешней вольтамперной характеристикой применяют трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием. В формировании вольтамперной характеристики выпрямителя может участвовать и выпрямительный блок, собранный на управляемых полупроводниковых элементах – тиристорах.

По конструкции силовой части сварочные выпрямители можно разделить на шесть групп (рис. 6.6) [108].

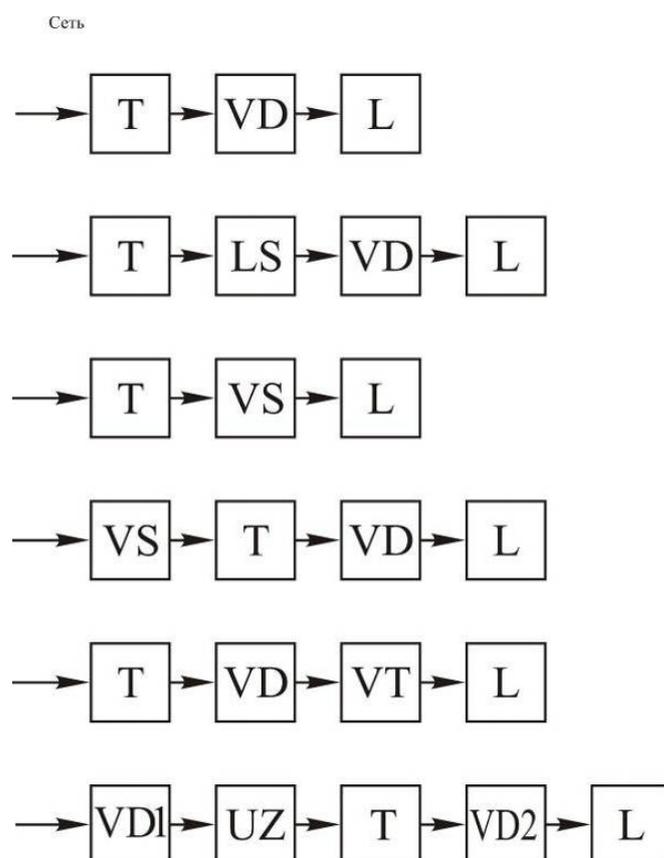


Рис. 6.6. Блок-схемы сварочных выпрямителей

Более ранняя и простая конструкция у выпрямителя, регулируемого трансформатором блок-схема 1 (рис. 6.6). Его силовая часть состоит из трансформатора  $T$ , выпрямительного блока, собранного на диодах  $VD$  и сглаживающего дросселя  $L$ . Трансформатор в этом случае обеспечивает понижение питающего напряжения, формирование требуемой вольтамперной характеристики и регулирование режима сварки. Блок-схема 2 сварочного выпрямителя с дросселем насыщения  $LS$  (рис. 6.6), обеспечивает формирование внешней характеристики и регулирование требуемого режима сварки. Блок-схема 3 сварочного выпрямителя, вы-

прямительный блок ( $VS$ ) которого собран на управляемых полупроводниковых элементах – тиристорах. Регулирование требуемого режима сварки, в этом случае, осуществляется за счет изменения угла отпирания тиристорov выпрямительного блока  $VS$ . Дроссель  $L$  в этом случае обеспечивает сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения, которые тем больше, чем позднее осуществляется открытие выпрямительного элемента относительно полуволны питающего напряжения. В отдельных случаях управление выходным напряжением выпрямителя осуществляется управляемыми полупроводниковыми элементами – тиристорами, включаемыми в цепь первичной обмотки трансформатора (рис. 6.6, блок-схема 4). В этом случае выпрямительный блок  $VD$  изготавливается из неуправляемых выпрямительных элементов – диодов, которые схемотехнически располагают во вторичной цепи понижающего трансформатора  $T$ . Сварочные источники питания чопперного типа (рис. 6.6, блок-схема 5) имеют в своей структуре силовой полупроводниковый коммутатор, чаще всего на базе мощного транзисторного блока  $VT$ , который в данном случае обеспечивает управление режимом сварки. Блок-схема 6 характеризует выпрямитель инверторного типа. Инвертор  $UZ$  преобразует выпрямленное напряжение, поступающее с выпрямительного блока  $VD1$ , в переменное высокой частоты, которое затем поступает на вход понижающего трансформатора  $T$ . Благодаря высокой частоте переменного напряжения, габариты такого трансформатора кратно уменьшаются, что имеет большое значение при эксплуатации такого источника питания. Далее, переменное напряжение высокой частоты поступает на неуправляемый выпрямительный блок  $VD2$ , который преобразует его в постоянное с минимальной пульсацией выходного напряжения. Дроссель  $L$  в этом случае обеспечивает требуемые динамические свойства источника питания, поскольку пульсации выходного напряжения минимальные и в качестве сглаживающего элемента в системе питания его применение не является актуальным, по сравнению с традиционными выпрямителями на диодах или тиристорах.

Одним из первых и самым популярным сварочным выпрямителем тиристорного типа в России был сварочный выпрямитель ВДУ-506, который был разработан во ВНИИЭСО в 80-е годы. Выпрямитель ВДУ-506 создавался исходя из идеологии сварки в защитных газах, наиболее распространенной в те годы. Так как в основном использовалась сварочная проволока типа Св-08Г2С диаметром 2,0 мм, а в качестве защитного газа применялся углекислый газ, то конструкция сварочного выпрямителя была рассчитана на большой сварочный ток (более 400А) и имела регулируемый дроссель, который изменял свою индуктивность в зависимости от стадии каплепереноса электродного металла (наиболее

эффективной была регулировка дросселя на токах до 100А). При коротком замыкании дугового промежутка, дроссель уменьшал свою индуктивность, что приводило к увеличению пикового значения тока короткого замыкания. По мнению разработчиков ВДУ-506, большее значение тока в момент повторного возбуждения дуги, способствовало повышению стабильности этого интервала.

Установка ВДУ-506 была целевой, предназначенной для сварки на больших токах дуги и диаметрах сварочной проволоки, поэтому динамические свойства этого выпрямителя были невысокими и в конце 90-х годов, когда проявилась тенденция к снижению сварочного тока и уменьшению диаметра сварочной проволоки, а также к применению смесей газов при сварке, применение их стало ограниченным.

Однако, в ряде отраслей промышленности, где используются форсированные режимы сварки, эти выпрямители не имеют альтернативы. На ОАО «ЭЛЕКТРИК» выпускались сварочные установки типов ВДУ-505 и ВДУ-3010 с аналогичными характеристиками. На ОАО «СЭЛМА» аналогичные установки выпускаются по настоящее время под названием ВДУ-506С. Зарубежным аналогом такого источника является выпрямитель LAW-520 фирмы «ESAB», Швеция.

Примерно в эти же годы в промышленности активно применялись сварочные выпрямители: ВС-300, ВС-300Б, ВС-600, ВС-632 и др., которые достаточно эффективно применялись для механизированной сварки. Перечисленные выпрямители были разработаны ИЭС им. Патона в 70-е годы и отличались, прежде всего, конструктивной простотой. Регулировка тока дуги осуществлялась за счет ступенчатого изменения напряжения. Дроссель был неуправляемый, поэтому каждый тип такого выпрямителя для получения оптимальных сварочных свойств был рассчитан на определенный диапазон тока дуги.

С учетом опыта использования выпрямителей ВС-632 впоследствии были разработаны значительная гамма сварочных выпрямителей со ступенчатой регулировкой тока дуги, такие как КЕМPOWELD, Финляндия, ESABMIG, Швеция, VARIOSTAR, Австрия, ВС-300, 4020, 600, ИТС, Россия и многие другие фирмы.

Высокие сварочные свойства этих выпрямителей достигаются за счет тщательно подобранных индуктивностей трансформатора и дросселя в определенном диапазоне сварочного тока. Эти сварочные установки вместе с подающими механизмами ранцевого типа (Адмиралтеец, ПДГ-322 и др.) по настоящее время широ-

ко используются, например, в российском судостроении на таких предприятиях, как «Адмиралтейские верфи», С-Петербург, ЦТСС «Звездочка», Северодвинск и многих других предприятиях. Основным диаметром сварочной проволоки составляет 1,2 мм, ток дуги – не более 300А. Их главными положительными чертами являются высокая ремонтпригодность и простота в обслуживании. Недостатком является высокие требования к точности поддержания сварочного режима. В последнее время появились сварочные установки такого типа с элементами синергетики.

В конце 90-х годов на промышленных предприятиях стали активно применяться универсальные тиристорные сварочные выпрямители типа ВД-506ДК и ВДУ-511, разработанные в ЗАО НПФ «ИТС». Импортным аналогом является тиристорный сварочный выпрямитель типа DC-400 (IDEAL ARC) фирмы LINCOLN ELECTRIC, США. Конструктивной особенностью этих сварочных установок является использование дополнительного маломощного источника питания (дополнительный дроссель или батарея конденсаторов), которые разряжаются на дуговой промежуток в момент его замыкания. Таким образом, процесс сварки в значительной степени стабилизируется, и требования к поддержанию точности сварочного режима снижаются. Эти выпрямители обеспечивают работу в широком диапазоне изменения сварочного тока и напряжения, позволяют выполнять сварку всех слоев сварного шва, включая корневой, с формированием обратного валика на весу во всех пространственных положениях. Основные типы применяемой сварочной проволоки – сплошного сечения и порошковая, диаметром 1,2 и 1,6мм.

При всем многообразии существующих источников питания для сварки в защитных газах, в таблице 6.1 приведены технические характеристики наиболее востребованных типов оборудования, выпускаемого ведущими производителями стран СНГ, а также некоторых зарубежных фирм: ESAB (Швеция), Lincoln Electric (США), EWM (Германия), BESTER (Польша).

Таблица 6.1

*Технические характеристики источников питания для сварки в защитных газах*

Тип	Сила тока, А при ПВ 60%	$U_{xx}$ , В	Пределы регулирования		Число ступеней	Индуктивность дросселя, мГн	Масса, кг
			Силы тока, А	Напряжения, В			
BC-300	385	42	50-385	17-38	24	0,2-0,3	120
BC-300Б	385	42	50-365	18-35	24	0,2-0,3	185
ВДГ-401	380	75	80-500	22-38	Плавноступенчатое	0,2-0,3	200
КИГ-401	400	60	100-400	22-38	32	0,2-0,3	250
BC-600	630	65	100-700	18-66	32	0,2-0,3	280
ВДУ-506**	500	82	50-500	17-45	Плавное	0,45	300
ВДУ-511**	500	70	50-500	17-45	Плавное	0,45	200
ВДУ-601**	600	85	60-630	17-45	Плавное	0,45	290
Idealarc DC-400**	400	70	60-500	12-42	Плавное	0,2-0,3	215
Saturn351	300	70	30-350	12-42	16	0,2-0,3	112
Wega 601	450	70	50-600	17-45	12	0,45	228
MAGSTER 501W	450	70	60-500	12-42	35	0,3-0,4	140
ESABMIG C420 .	420	70	30-420	18-42	35	0,3	209

## 6.2. Источники питания для дуговой сварки в защитных газах инверторного типа

Бурное развитие силовой полупроводниковой электронной техники за последние 15–20 лет привели к появлению в сфере сварочного производства нового класса оборудования – инверторных источников питания [109].

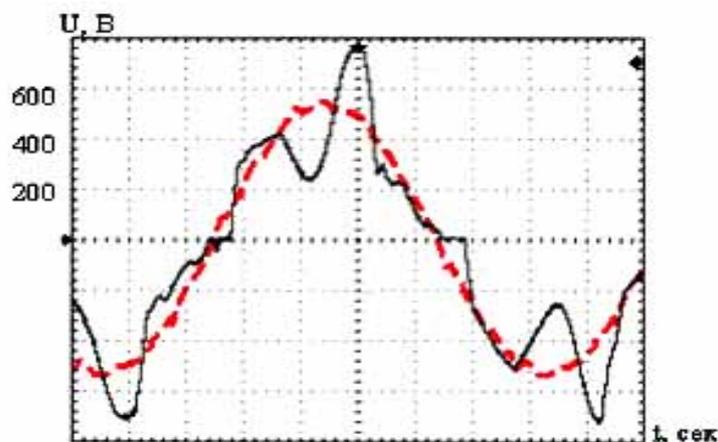
Первые образцы инверторных источников для сварки стали применяться в 80-е годы прошлого столетия. Причиной их активного применения стало резкое снижение материальных затрат при производстве этой техники и снижение стоимости электронных комплектующих, что

обеспечило значительные преимущества фирмам-производителям. В судостроении России наиболее активно применялись сварочные источники фирмы Kemppi OY (Финляндия). Начато было производство таких источников и на предприятиях Советского Союза: прежде всего на Украине (Симферополь, Харьков, Киев), затем и в России (Рязань, Чебоксары, С-Петербург, Оренбург, Томск, Екатеринбург и др.).

Характерными показателями работы сварочного инвертора являлись их универсальность, т.е. возможность применения для различных способов сварки: MMA, TIG, MIG, MAG. Особенно бурными темпами растет внедрение инверторной сварочной техники для полуавтоматической и автоматической сварки, как в защитных газах, так и порошковыми проволоками различного типа, выпускаемой предприятиями Швеции, Германии, Австрии, Англии, США, Украины и России. В основном для сварочно-монтажного производства характерно использование сварочной проволоки диаметром 1,2 мм и газовой смеси в качестве защитного газа. Во многих типах современных инверторов, например, инверторах фирмы EWM, Германия, ограничено применение различных типов порошковых проволок. С этой проблемой столкнулись мостостроители. Как правило, имеется ограничение по току дуги на уровне 400А.

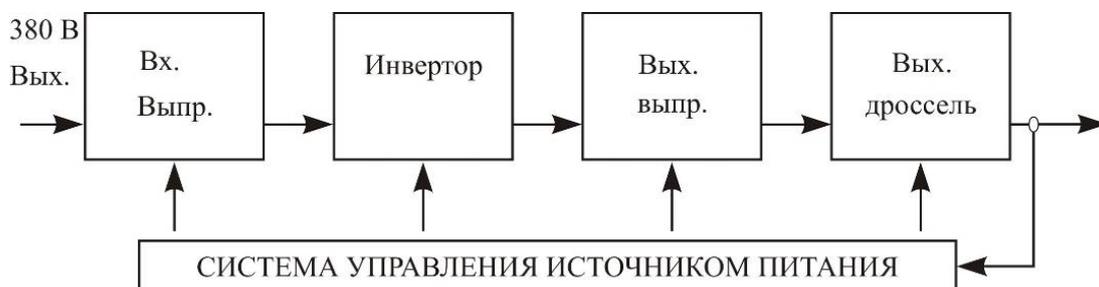
Инверторные источники имеют ряд преимуществ, обусловленных их низкими массогабаритными показателями по сравнению с традиционными сварочными выпрямителями. К числу их недостатков относятся негативное влияние традиционных сварочных инверторов на питающую электрическую сеть – индукционные броски напряжения в питающей сети, возникающие при отключении мощных нагрузок, причем источником импульса является силовая подстанция. На рис. 6.7 приведена осциллограмма напряжения электрической сети при работе сварочного инвертора и пики перенапряжения в виде высокочастотных гармоник, накладывающихся на осциллограмму синусоиды электрической сети.

Такое искажение электрического напряжения оказывает негативное воздействие на силовую сварочную подстанцию и на все другие электрические приборы, подключенные к этой сети.



*Рис. 6.7. Вид синусоиды электрической сети и высокочастотные гармоники перенапряжения (до 800В), накладывающиеся на сеть при работе сварочного инвертора*

Отмеченный недостаток существенно ограничивает область их применения, например, в судостроении, потребовалась бы реконструкция электросетей, в частности, обеспечения бесконтактной коммутации мощных нагрузок в момент перехода фазы тока через ноль, системы частотного управления пуском и торможением мощных электродвигателей и т.д. Стоимость такой реконструкции, может существенно превысить затраты на обновление парка сварочного оборудования. Выше-сказанное явилось причиной малого использования инверторных сварочных источников на головных предприятиях отрасли – ОАО «СЕВМАШ» и ЦТСС «ЗВЕЗДОЧКА». Кроме того, в традиционных сварочных инверторах не решена проблема высоких требований к точности поддержания сварочных режимов. Базовая схема инверторного источника питания приведена на рисунке 6.8.



*Рис. 6.8. Блок схема инверторного источника питания*

В состав инверторного источника питания, как правило, входят: входной выпрямитель, инверторный блок, Выходной выпрямительный блок, дроссель и схема управления работой инверторного источника питания. При всем многообразии схмотехнических и конструктивных решений инверторных источников питания, общим и на наш взгляд самым важным их преимуществом перед традиционными источниками питания, является их универсальность и более высокие технологические и динамические свойства. Все это позволяет в современных инверторных источниках питания реализовать ряд полезных и удобных для работы их потребительских качеств, а именно:

- Изменение наклона внешней характеристики по любой программе. Режим предназначен для регулирования проплавающей способности дуги;
- Возможность плавного изменения напряжения холостого хода, в том числе его ограничение на безопасном уровне при отсутствии нагрузки. Это так называемый «Безопасный режим», когда напряжение холостого хода снижается до 12В, если сварка не производится в течении некоторого времени;
- Наличие «Горячего старта», что обеспечивает увеличение тока в начале сварки на заданное время. Режим предназначен для облегчения стабильности возбуждения дуги и формирования сварочной ванны в начале процесса сварки;
- Наличие сервисной функции «Антизалипание», которая обеспечивает уменьшение тока выпрямителя при коротком замыкании, если оно длится более устанавливаемой длительности времени;
- Обеспечение возможности управления сварочным выпрямителем при помощи пульта дистанционного управления.

При работе сварочных инверторов, разработчики стремятся отследить все стадии каплепереноса электродного металла, поэтому наибольшие достижения в конструкции систем управления инверторных сварочных установок имеются у фирм LORCH (Германия), Fronius (Австрия), КЕМРРІ (Финляндия). Это приводит к тому, что сварочные установки стали напоминать сложные компьютерные системы, а, следовательно, требуют высококвалифицированного обслуживающего персонала. Этот путь развития сварочной техники, на взгляд многих специалистов, способен привести в тупик. В таблице 6.2 приведены технические характеристики некоторых, наиболее широко применяемых инверторных источников питания, выпускаемых России, Украине, а также странах ближнего и дальнего зарубежья.

Таблица 6.2

*Технические характеристики инверторных источников питания для сварки*

Тип	Сила тока, А при ПВ 60%	U <sub>xx</sub> , В	Пределы регулирования		Регулирование	Масса, кг
			Силы тока, А	Напряжения, В		
Форсаж-500 (ГРПЗ)	420	90	50–500	15–40	Плавное	38
Технотрон ДС 400.	400	113	50–400	16–36	Плавное	49
Эллой (Н.Н.) МС-500М	500	60–70	20–500	15–45	Плавное	48
ИТС DM 380	380	58	30–380	12–36	Плавное	30
ИТС ОРИОН-500	500	58	4–500	14–55	Плавное	55
Кемppi FastMig KM 500	520	65	10–500	10–42	Плавное	36
Fronius TPS-5000	500	70	3–500	14,2–39	Плавное	35,6
ESAB Mig 5000	500	72–88	16–400	10–42	Плавное	66
Invertec V350-PRO	350	80	5–425	15–42	Плавное	37

### 6.3. Конверторные (чопперные) источники питания

Конверторные источники (рис. 6.9) стали активно применяться на промышленных предприятиях в начале двадцать первого века. Они пришли на смену инверторным.

Основным отличием от инверторных источников питания является то, что электрическое питание сварочных конверторов осуществляется от традиционных электрических шин напряжением постоянного тока 50...90В. По выходным параметрам инверторные и конверторные сварочные источники полностью идентичны. Для сварочных конверторов типовой является несущая частота 19–20 кГц.

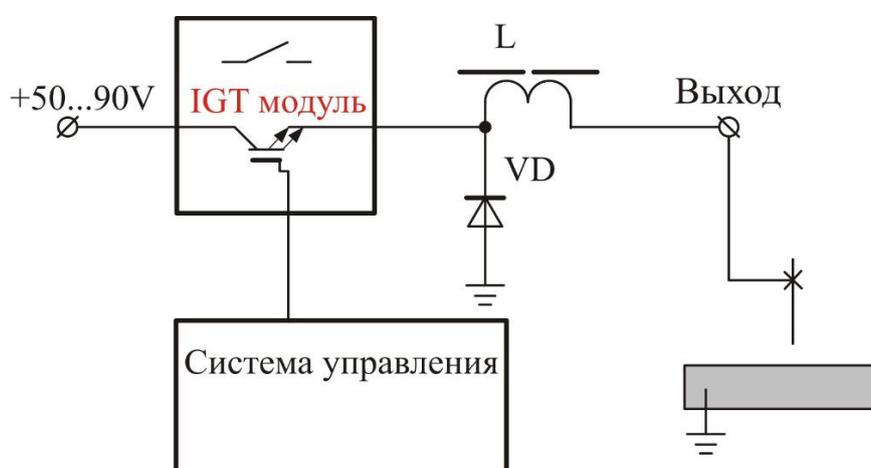


Рис. 6.9. Блок-схема конверторного источника питания

Характерной особенностью конверторного источника питания является наличие силового полупроводникового блока, собранного на базе силовых IGBT транзисторах, который включается последовательно в сварочную цепь. Это обеспечивает следующие преимущества сварочных конверторов по сравнению с инверторами:

- Низковольтное питание (50...90В постоянного тока) позволяет без ограничений, связанных с безопасностью работ, применять конверторы для сварки конструкций на плаву, в замкнутых объемах и на открытом стапеле;
- Малые вес и габариты позволяют размещать конверторы на эстакадах, на палубе и внутри строящихся заказов;
- Нечувствительность к броскам напряжения в заводской сети, в отличие от инверторных сварочных источников;
- Отсутствие негативного влияния на питающую электрическую сеть по сравнению со сварочными инверторами;

- Отсутствие взаимного влияния постов при многопостовой сварке.

Конверторы (чопперы) являются непосредственными преобразователями постоянного тока в постоянный, предполагают работу при низких (допустимых ПУЭ) напряжениях питания и поэтому не обладают факторами снижения надежности, свойственным инверторам. Кроме того они безопасны в эксплуатации.

Впервые в России работы по созданию сварочных конверторов начались в ЗАО НПФ «ИТС». Создана гамма сварочных конверторов КСУ-320 и КСУ-500 (для ручной дуговой и механизированной сварки), КСС-50ТИГ – для аргонодуговой сварки титана, а также, так называемые сетевые сварочные конверторы при питании от стандартной электрической сети – ВДУ-1500 для автоматической сварки под слоем флюса с подачей ультразвука в область сварочной ванны и ВД-320КС для ручной дуговой и механизированной сварки. За рубежом наибольшие достижения по проектированию сварочных конверторов у фирм ESSETI (Италия) и LINCOLN ELECTRIC (США). Вместе с тем известны примеры производства конверторных источников питания фирмой ESAB, а также Болгарской фирмой «Сруна», которая разрабатывает и производит чопперные источники на токи до 800 А.

#### **6.4. Рекомендации по практическому применению и настройке процессов сварки с короткими замыканиями дугового промежутка**

Характер течения процесса с частыми короткими замыканиями в большой степени зависит от скорости нарастания  $I_{к.з}$  в цепи. При больших скоростях нарастания  $I_{к.з}$  ( $\Delta I_{к.з}/\Delta t > 150 \div 200$  кА/с) процесс стабилен, но сопровождается повышенным разбрызгиванием. При малых  $I_{к.з}$  ( $\Delta I_{к.з}/\Delta t < 40$  кА/с) процесс силы тока выражен слабо, и на низких напряжениях протекает с редкими короткими замыканиями, импульсный характер изменения процесса протекает нестабильно. При средних «оптимальных»  $\Delta I_{к.з}/\Delta t$  (70–130 кА/с) процесс сварки проволоками 0,5–1,4 мм протекает стабильно и отличается небольшим разбрызгиванием (см. рис. 4.5). С увеличением диаметра электродной проволоки и тока сварки "оптимальные" значения  $\Delta I_{к.з}/\Delta t$  уменьшаются [5, 6, 110]. Изменение наклона внешней характеристики в пределах от 0,04 до 0,08 В/А не меняет характера и стабильности течения процесса сварки проволоками диаметром 0,5–1,4 мм. С увеличением угла наклона внешней характеристики в этих пределах несколько увеличивается внешняя составляющая длина дуги, уменьшается число коротких замыканий и улучшается формирование шва. При увеличении наклона более 0,10 В/А случайные нарушения вылета электрода или скорости подачи проволоки приводят

к значительным изменениям длины дуги и напряжения, а также к увеличению разбрызгивания. При растущей внешней характеристике с подъемом более + 0,04 В/А затрудняется восстановление стабильного процесса при случайных нарушениях.

Питание дуги от источников с комбинированной внешней характеристикой падающей в с наклоном 0,15–0,20 В/А в диапазоне токов до 250А и пологопадающей с наклоном 0,02–0,04 В/А при скоростях нарастания тока короткого замыкания в пределах 50–80 кА/с обеспечивает при сварке в СО<sub>2</sub> получение более длинной и мягкой дуги. При этом диапазоны токов стабильного процесса с короткими замыканиями несколько шире, чем при питании от источников с пологопадающей внешней характеристикой (табл. 6.3). Формирование лучше (шов шире, усиление меньше, несколько меньше глубина провара). Разбрызгивание меньше, чем при обычной сварки в СО<sub>2</sub> с питанием от выпрямителей с пологопадающей внешней характеристикой с наклонами 0,02–0,03 В/А.

Таблица 6.3

*Диапазоны токов стабильного течения процесса сварки в СО<sub>2</sub> с частыми короткими замыканиями при питании от источников с комбинированной внешней характеристикой (проволока Св-08Г2С, полярность обратная)*

Внешняя характеристика источника тока	Диаметр электрода, мм			
	0,8	1,0	1,2	1,4
Комбинированная	50–150	55–240	85–260	90–280
Жесткая	20–180	25–260	30–290	40–310

Разбрызгивание при сварке в СО<sub>2</sub> проволоками марок Св-08ГС, Св-08Г2СА, Св-08ГСТ, Св-10ГСМТ диаметром 0,5–1,4 мм на малых токах и низких напряжениях (на режимах с принудительными короткими замыканиями) при питании от источников с оптимальными динамическими свойствами, оптимальных соотношениях напряжения, тока и вылета электрода обеспечении их постоянства сравнительно невелико (3–4%). Выброс брызг происходит в основном при перегорании шейки между электродом и каплей, переходящей в шов (рис. 4.5, г). «Оптимальные» скорости нарастания тока короткого замыкания, обеспечивающие минимальное разбрызгивание, зависят от диаметра электрода, напряжения сварки и положения шва [19, 110].

При увеличении напряжения и тока сварки, а также вылета электрода увеличиваются длина дуги, оттеснение каплей от ванны, их размер и беспорядочное колебание. Если перед отрывом от электрода

крупная капля оказывается над взрывающейся шейкой, то силой взрыва шейки, капля выбрасывается за пределы ванны (рис. 4.5). При большой силе взрыва наблюдается также расплескивание ванны и плохое формирование шва. Выброс крупной капли наблюдается и при окончании сварки, если напряжение не было понижено. Выброс капель и расплескивание ванны зависит от силы взрыва жидкой перемычки. Ограничение скорости нарастания и величины тока короткого замыкания уменьшает разбрызгивание и улучшает формирование шва.

При сварке от источников тока с пониженными скоростями нарастания тока короткого замыкания капли не успевают переходить в ванну, нерасплавленный конец электродной проволоки погружается в ванну жидкого металла, а затем перегорает со взрывом, это приводит к нарушению процесса сварки и расплескиванию ванны (рис. 4.5). При пониженных скоростях нарастания тока короткого замыкания наблюдаются затруднения в установлении процесса сварки, также увеличивающиеся разбрызгивание.

При износе токоподвода в горелке наблюдается прихватывание проволоки в токоподводе и резкие изменения скорости подачи электродной проволоки. Процесс сварки нарушается и разбрызгивание увеличивается. При нарушении защиты зоны сварки, при сварке ржавой и грязной проволокой, а также ржавого, покрытого смазками, жиром или красками металла в зону сварки попадают водород, азот, повышенное количество кислорода. В результате дуга горит нестабильно, на электроде образуются крупные капли, которые часто взрываются резко увеличивая разбрызгивание. Резкие неравномерные колебания руки сварщика полуавтоматчика и большие наклоны электрода приводят к нестабильному переходу капель в ванну и увеличению разбрызгивания.

## **6.5. Оборудование для сварки в защитных газах**

Комплект оборудования для сварки в защитных газах плавящимся электродом состоит из аппарата для подачи электродной проволоки, источника сварочного тока, аппаратуры питания защитным газом и общего блока управления этими узлами.

Сварочные установки подразделяют:

- по назначению – на стационарные установки, станки-автоматы, самоходные автоматы, полуавтоматы и роботы;
- по диаметру используемой проволоки – на аппараты для сварки тонкой проволокой (диаметром 0,7–1,4 мм), универсальные для сварки проволоками диаметром 1,0–2,5 мм и толстыми проволоками 3,0 мм и более;

– по току сварки – на малые до 150–180 А, средние до 315–500А, на большие до 630А и более.

Сварочные установки должны обеспечивать качественное начало шва, постоянные заданные размеры и качество шва и качественное окончание шва. Это достигается путем определенной последовательности включения и выключения газового клапана, источника тока и двигателя подачи электродной проволоки, общим блоком управления установки.

Наибольшее распространение в промышленности получили полуавтоматы. Их узлы часто используют в установках и роботах

**Полуавтоматы – установки для механизированной сварки.** К сварочным полуавтоматам относят аппараты, у которых автоматически поддерживается заданный электрический режим сварки, а включение сварки, перемещение дуги вдоль свариваемых кромок и выключение сварки выполняется сварщиком кнопкой на держателе вручную. Под термином – «полуавтомат для сварки в защитных газах» подразумевают установку, которая состоит из механизма подачи электродной проволоки с катушкой проволоки, держателя с гибким шлангом, газовой аппаратуры для обеспечения защитным газом, источника питания дуги и общего блока управления (рис. 6.10) [8, 19].

Сварочные полуавтоматы подразделяют (рис. 6.10):

1) по конструктивному исполнению на: двухблочные, у которых механизм подачи проволоки и источник тока выполнены в отдельных корпусах; одноблочные, у которых механизм подачи проволоки и источник питания дуги выполнены в общем корпусе; специальные (монтажные, для сварки мягкими проволоками со сложными механизмами подачи типа «тяги-толкай», с пульсирующей подачей проволоки и др.). Однако, двухблочные полуавтоматы иногда поставляют без источника тока, тем не менее сохраняя за неполным комплектом наименование «полуавтомат».

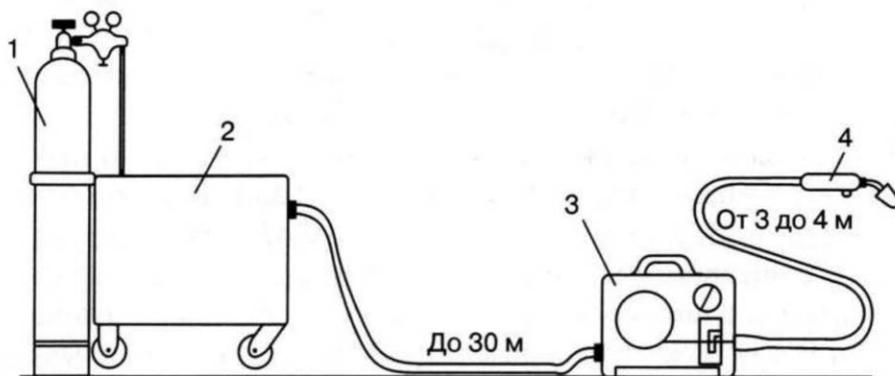
2) по диаметру и типу сварочной проволоки на полуавтоматы для сварки проволоками диаметром 0,6–1,4; 1,2–1,6 и 1,6–2,5 мм сплошного сечения и порошковыми проволоками до 3,2 мм.

3) по току сварки – до 150–180 А; до 250–300 А; до 315–400А; до 500А и до 630А.

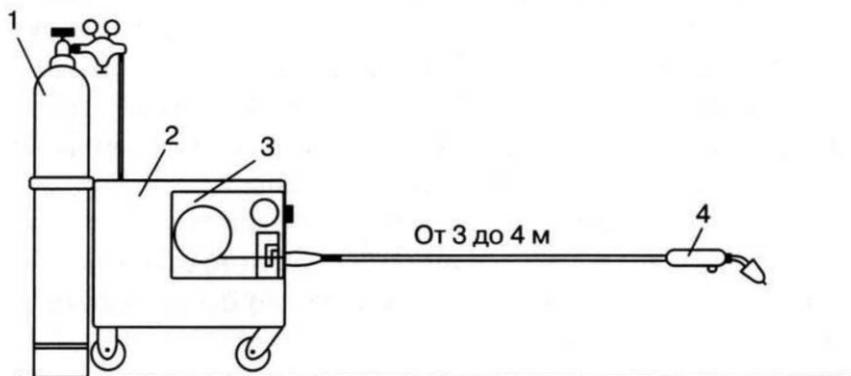
Большая часть узлов полуавтоматов изготавливается серийно.

**Сварочные горелки** предназначены для подвода к месту сварки электродной проволоки, тока и защитного газа. Сварочная горелка сменный инструмент, конфигурация, размеры и устройство которого должны соответствовать типоразмеру свариваемого изделия.

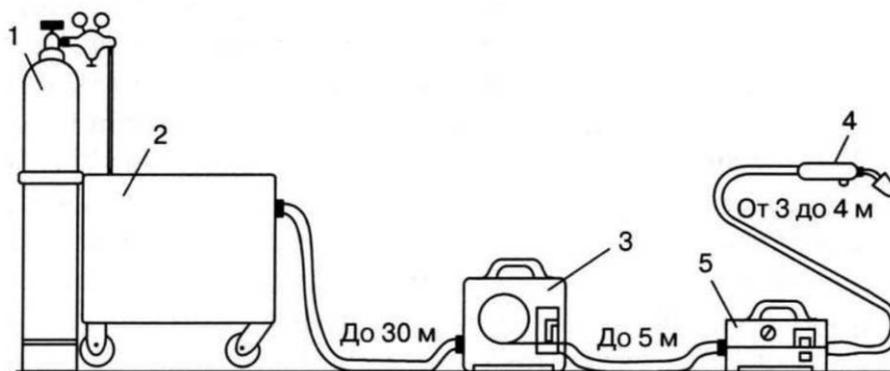
При сварке в  $\text{CO}_2$  на токах до 400 А, а в смеси  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  до 350А, применяют горелки без охлаждения. На больших токах применяют горелки с водяным охлаждением. Водяное охлаждение горелок повышает ресурс сопла и токоподвода.



а)



б)



в)

Рис. 6.10. Схемы полуавтоматов для сварки в защитных газах: а) двухблочные; б) одноблочные; в) специальные (1 – баллон с газом, 2 – источник тока, 3 – механизм подачи проволоки, 4 – горелка, 5 – дополнительный механизм подачи проволоки)

Простейшую горелку для сварки в  $\text{CO}_2$  и  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  (рис. 6.11) изготовляют из двух медных трубок, вставленных друг в друга с зазором, по которому подается газ в сопло, стальной сменной спирали 8, концевых втулок 11 и 12, токоподвода и газового сопла 2. Для надежной подачи тонкой проволоки необходимо, чтобы внутреннее отверстие спирали 8 было в 1,5–2 раза больше диаметра проволоки. Для получения стабильного процесса и небольшого разбрызгивания необходимо обеспечить постоянство вылета электрода и исключить прихватывание проволоки к токоподводу. Постоянный контакт проволоки с нижней частью токоподвода достигают за счет пружинящих свойств самой проволоки или специальными прижимами.

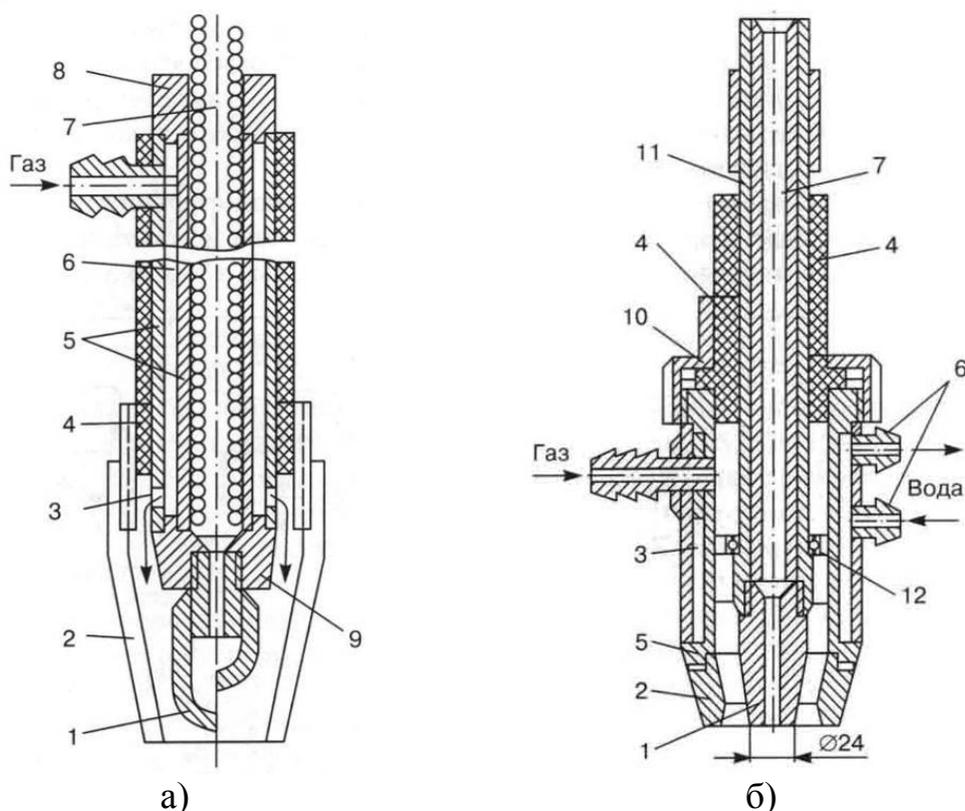


Рис. 6.11. Горелка для сварки в  $\text{CO}_2$  на значениях тока: а) малых; б) больших (1 – токоподвод, 2 – газовое сопло, 3 – отверстие выхода газа, 4 – изолятор, 5 – корпус, 6 – водяное охлаждение, 7 – сменная спираль или трубка, 8 и 9 – концевые втулки, 10 – гайка, 11 – мундштук, 12 – распылитель газа)

В горелках со снятым токоподводом, проволока на выходе должна загибаться, а токоподводящий наконечник обеспечивает выравнивание и постоянное направление проволоки. Некоторые конструкции токо-

подводов, применяемых на производстве, показаны на рис. 6.12. Применение токоподводов из металлокерамики повышает ресурс работы токоподвода. Однако, до сих пор актуальна разработка конструкций простых устройств, принудительно прижимающих проволоку к токоподводу, что намного повысит ресурс работы токоподвода и снизит разбрызгивание при сварке. Надежность газовой защиты в значительной степени определяется конструкцией горелки. Струя газа должна истекать из сопла сплошным равномерным потоком. Для этого на пути газа в сопло устанавливают рассекатели или сеточки. Сопла для  $CO_2$  делают цилиндрическими или слегка конусными. Металлические сопла горелок изолируют от токоведущих частей.

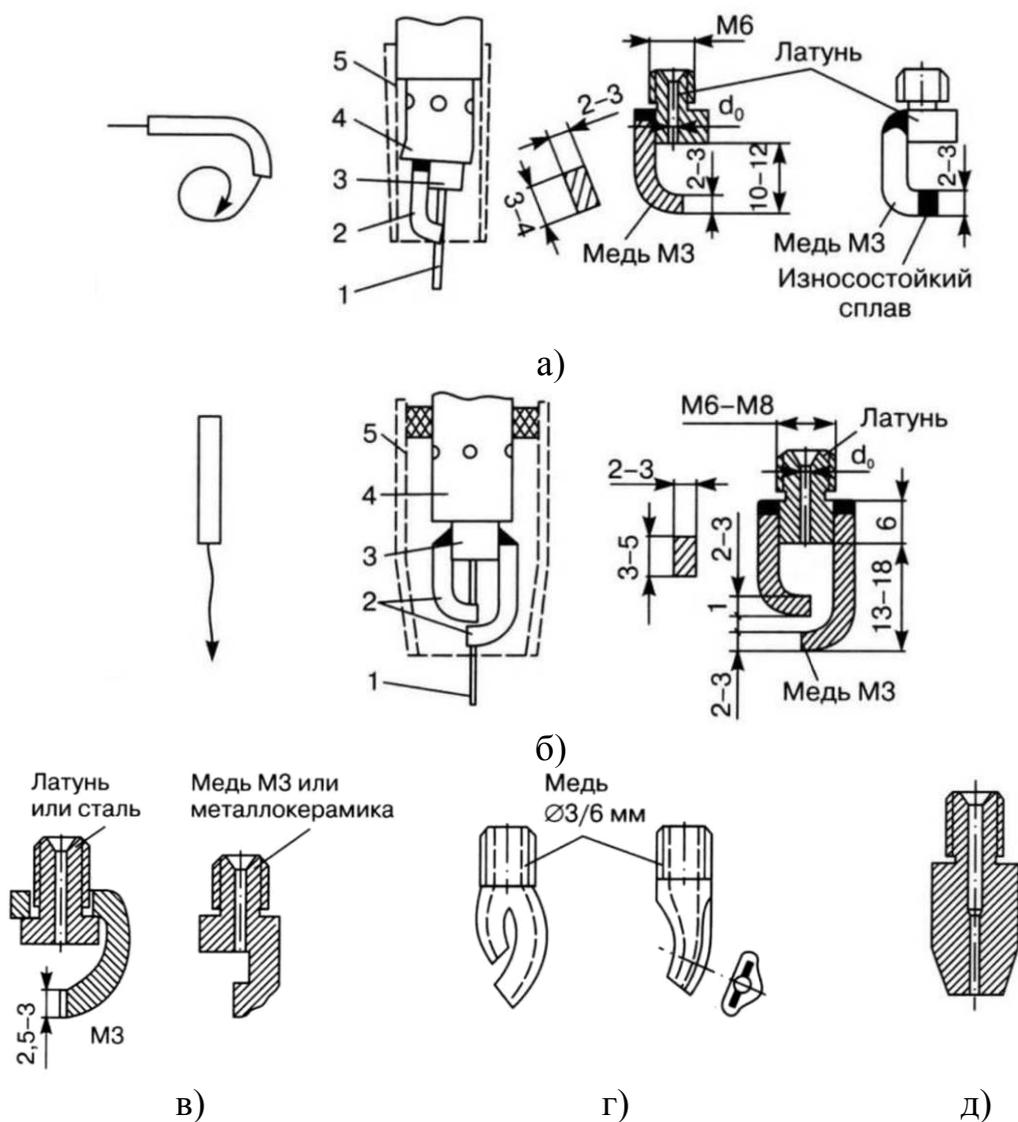


Рис. 6.12. Токоподводящие наконечники горелок для сварки в  $CO_2$  проволокой диаметром: а – г) 0,8–1,4 мм; д) более 1,6 мм

Держатели для полуавтоматической сварки соединяются с механизмом подачи проволоки гибким шлангом, по которому подаются к держателю проволока, защитный газ и ток. Промышленность серийно выпускает держатели вместе с гибкими шлангами на токи 150–630 А (табл. 6.4).

Таблица 6.4

*Технические характеристики держателей со шлангами*

Тип	Диаметр проволоки, мм	Сила тока, А при сварке в		Диаметр штека, мм или разъем
		CO <sub>2</sub>	Ar+CO <sub>2</sub>	
ИГДГ-201	0,8–1,0	180	150	12 и 15мм
ИГДГ-201Е	0,8–1,0	200	180	евро
ГДИГ-305	0,8–1,4	315	260	12, 15 и евро
ГС-400	1,0–1,6	350	300	12, 15
РГЦ-2	1,0–1,6	500	400	12, 15
AL 2300*	0,6–1,2	230	200	евро
AL 3000*	0,8–1,2	300	250	евро
ABMIG**	0,8–1,2	250	220	евро
	1,0–1,6	340	320	евро

\* фирмы Fronius, \*\* фирмы Abicor Binzel

Мундштук горелки делают часто поворотным или съёмным это делает горелку более универсальной и удобной в работе. Для облегчения и удобства работы размеры и масса держателей должны быть как можно меньшими.

**Механизмы подачи электродной проволоки** состоят из привода (электродвигателя с понижающим редуктором) и системы роликов, подающих электродную проволоку. Механизм подачи должен обеспечивать стабильную подачу проволоки в заданных диапазонах скоростей с усилием, достаточным для преодоления сопротивления при движении проволоки от катушки с запасом проволоки до выхода из токоподвода. Приводы с электродвигателями постоянного тока часто требуют специальных схем, обеспечивающих постоянство скоростей подачи проволоки и не рассчитаны на повышенные перегрузки, связанные с прихваткой проволоки в токоподводящих наконечниках. Некоторое исключение составляют приводы позаимствованные из авиационной техники. Они малогабаритные, легкие и, как показал опыт их применения, обеспечивают стабильную подачу, и плавное регулирование скоростей подачи проволоки без специальных электронных схем управления.

На работоспособность полуавтоматов большое влияние оказывают конструкция и настройка узла механизма прижима и подачи электродной проволоки. В аппаратах для сварки проволоками Св-08Г2С диаметром 1,6 мм и более подающий ролик обычно делают с канавкой, а прижимной гладким. В аппаратах для сварки проволоками диаметром 0,8–1,4 мм подающий ролик делают без канавки с тупой мелкой насечкой (шаг 0,8 мм), а прижимной гладким. Для предупреждения смещения и сминания проволоки перед роликами и после них устанавливают направляющие трубки, которые располагают как можно ближе к роликам на одной линии, перпендикулярной к оси вращения роликов и касательной к окружности одного из роликов. Для улучшения подачи проволок и сварки порошковыми проволоками механизм подачи содержит две пары роликов с канавкой, все ролики делают ведущими (рис. 6.13).

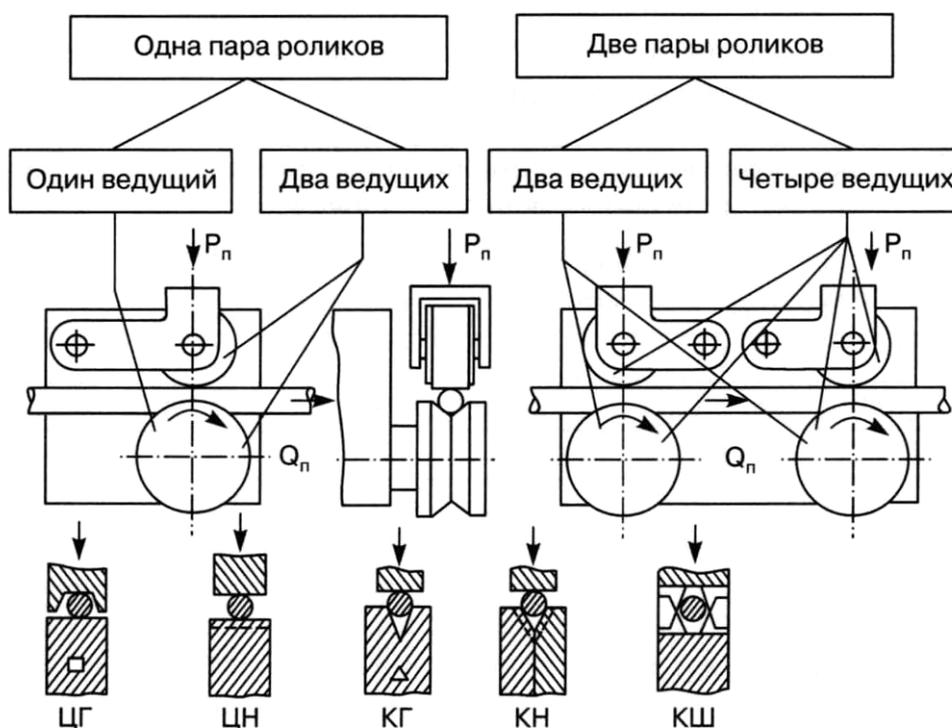


Рис. 6.13. Схемы роликовых устройств для подачи проволоки и типы роликов: ЦГ – цилиндрический гладкий; ЦН – цилиндрический с насечкой; КГ – с канавкой гладкий; КН – с канавкой насеченной составной; КШ – с канавкой шестеренчатые

**Блоки управления сварочным циклом аппаратов [6, 111, 112].** Блоки управления сварочным циклом должны обеспечивать настроечные операции при подготовке аппаратов к сварке и управление элементами сварочной установки от подачи сигнала на начало сварки, обеспе-

чения качественного начала сварки, стабильного течения сварки и прекращения сварки. Операция прекращения сварки должна обеспечивать готовность аппаратуры к выполнению начала сварки следующего шва без дополнительных настроечных операций (уменьшения вылета, удаления крупной капли, зачистки конца электродной проволоки и др.)

На рис. 6.14 показаны наиболее распространенные циклограммы, применяемые в сварочных аппаратах.

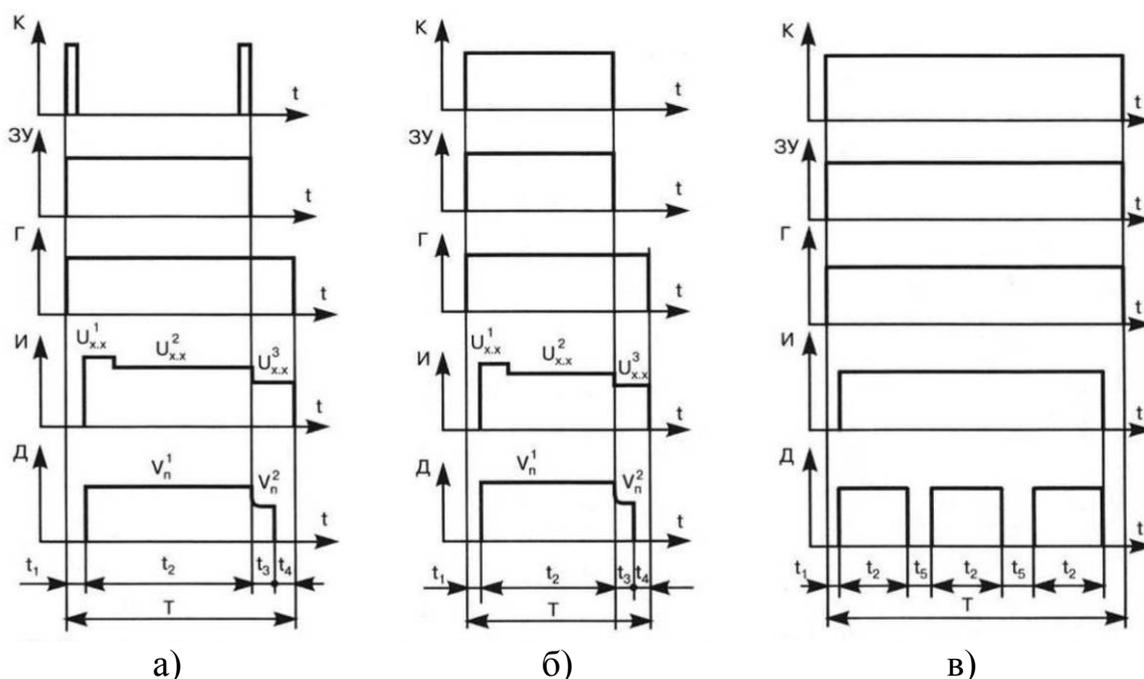


Рис. 6.14. Типичные циклограммы управления процессом сварки в защитных газах плавящимся электродом: а) в автоматах и полуавтоматах для сварки длинных швов; б) в полуавтоматах для сварки коротких швов; в) в аппаратах для сварки точками

(К – кнопка «Пуск»; ЗУ – запоминающее устройство; И – источник питания дуги; Г – газовый клапан; Д – двигатель подачи электродной проволоки;  $t_1$  – время предварительного включения газового клапана;  $t_2$  – время работы двигателя подачи электродной проволоки;  $t_3$  – время задержки выключения двигателя подачи проволоки;  $t_4$  – время задержки выключения источника тока и газового клапана;  $t_5$  – время перерыва между сваркой отдельных точек; Т – общее время сварки)

В сварочных аппаратах для сварки протяженных швов применяют 4-х тактный цикл управления (рис. 6.14, а). Для начала сварки нажимают и отпускают кнопку пуск (К). При этом включаются: запоминающее устройство – блок с заранее заданной программой включения и вы-

ключения газового клапана, источника тока и электродвигателя подачи электродной проволоки. Первым включается газовый клапан. Защитный газ поступает, к месту начала сварки, оттесняя воздух. Затем, с некоторой задержкой времени, включается напряжение источника питания дуги и двигатель подачи электродной проволоки. Процесс сварки начинается после перегорания электродной проволоки и выполняется на установленных заранее величинах напряжения и скорости подачи электродной проволоки (токе сварки). Подача команды на прекращение сварки производится повторным нажатием пусковой кнопки (К). При этом снижается напряжение источника тока и переключатся двигатель подачи электродной проволоки на меньшую скорость для заварки кратера. Затем двигатель подачи проволоки выключается, проволока останавливается и оплавляется дугой. Дуга обрывается. Защитный газ подается и защищает застывающий кратер шва. После этого отключается источник питания дуги и газовый клапан.

В полуавтоматах для сварки коротких швов (рис. 6.14, б) начало сварки выполняется нажатием кнопки пуск (К). При этом включается: запоминающее устройство с настроенной программой включения и выключения газового клапана, выпрямителя и двигателя подачи проволоки. Обычно, после включения газового клапана с задержкой 1–2 секунды включаются источник питания дуги и двигатель подачи электродной проволоки, настроенные на заданные значения напряжения и тока. Проволока перегорает на вылете и начинается процесс сварки. Сварка продолжается до тех пор, пока кнопка пуск (К) держится нажатой. При отпускании кнопки пуск (К) выключается двигатель подачи электродной проволоки, а через 2–4 секунды выключаются источник тока и газовый клапан.

В аппаратах для сварки точками (рис. 6.14, в) предусматривается упрощенная схема. При нажатии кнопки пуск (К) включаются запоминающее устройство, газовый клапан и источник питания дуги. С некоторой задержкой во времени включается двигатель подачи электродной проволоки. Запоминающее устройство задает время работы двигателя подачи электродной проволоки, необходимое для сварки одной точки. После этого двигатель подачи электродной проволоки выключается. Источник питания дуги и газовый клапан не выключается. После заданной выдержки запоминающее устройство подает сигнал на повторное включение двигателя подачи электродной проволоки для сварки следующей точки. Такой цикл повторяется для сварки заданного числа точек. После сварки последней точки с заданной выдержкой во времени выключается источник питания дуги и газовый клапан. При полуавто-

матической сварке включение и выключение двигателя подачи электродной проволоки выполняется сварщиком.

В программах для сварки на повышенных режимах после подачи команды на начало сварки, включаются запоминающее устройство, газовый клапан и источник питания дуги. С некоторой задержкой во времени включается двигатель подачи электродной проволоки. Запоминающее устройство задает время работы двигателя подачи электродной проволоки на малой скорости подачи. После зажигания дуги, скорость подачи увеличивают до заданных режимом значений. Прекращение сварки производится путем уменьшения напряжения дуги и скорости подачи проволоки (тока) для заварки кратера и только после заварки кратера отключается двигатель подачи проволоки, а после обрыва дуги отключают источник тока и газовый клапан.

В последние годы начат выпуск полуавтоматов, блоки управления которых содержат программы с «оптимальными» сочетаниями напряжения и тока, обеспечивающими стабильный процесс сварки с малым разбрызгиванием и хорошим формированием шва в разных пространственных положениях и в разных защитных газах. Установка конкретных программ производится с пульта управления. Следует отметить, что такие программы обеспечивают получение качественных сварных соединений только при условии соблюдения качества сборки соединений, величины и стабильности напряжения питающей сети переменного тока, в соответствии с требованиями европейских стандартов EN (напряжение сети 240В и 400В) и малых потерях напряжения в сварочной цепи. Технические характеристики некоторых серийно выпускаемых полуавтоматов для сварки в защитных газах приведены в приложении 4.

При использовании узлов полуавтоматов и, в первую очередь, источников тока необходимо учитывать показатель ПВ (показатель повторно-кратковременного режима работы), показывающий максимально допустимый ток сварки при указанном ПВ. Согласно ГОСТ–18130 в технических характеристиках указывается максимальный ток при ПВ=60%. При меньших ПВ максимально допустимый ток уменьшается.

$$ПВ = T_{св} \times 100 / (T_{св} + T_{п}), \text{ в } \% \quad (6.7)$$

где  $T_{св}$  – время сварки,  $T_{п}$  – время перерыва между сваркой отдельных швов.

Ориентировочно, при сварке коротких швов ПВ можно принимать 35–50%, при многослойной сварке толстого металла – ПВ=60–80%, при автоматической сварке толстого металла на повышенных токах ПВ=100%.

**Полуавтомат А-547Ум** предназначен для сварки в  $\text{CO}_2$ , смесях  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  и  $\text{Ar}$  проволоками диаметром 0,8–1,4 мм сплошного сечения и порошковыми диаметром 1,0–1,6 мм. В комплект полуавтомата входят малогабаритный переносной механизм подачи с катушкой электродной проволоки массой до 7,5 кг, держатель для сварки проволоками диаметром 0,8–1,0 мм на токах до 180А, держатель для сварки проволоками диаметром 1,0–1,4 мм на токах до 315 А с длиной шланга 3 м, пульт управления и газовый редуктор типа У30 с подогревателем углекислого газа. Источник тока в комплект поставки не входит. Блок управления полуавтоматом размещен в отдельном корпусе. В разное время полуавтомат поставлялся с выпрямителями ВС-200, ВС-300, ВС-300Б, ВДГ25-302, ВДГ25-401 и генераторами для зарядки аккумуляторов АЗД7,5/30 и ЗП7,5/30. Пульт управления устанавливается в нишу выпрямителей ВС-200 и ВС-300 (рис. 6.15).



*Рис. 6.15. Полуавтомат А-547Ум*

Электрическая схема полуавтомата питается от напряжения сварки. Полуавтоматы серийно изготавливаются ОАО «Артем-Контакт» г.Киев в 2-х модификациях: 1-я модель на базе привода с электродвигателем Д90-А-547У.7 с обмотками возбуждения и контактором, разрывающим сварочную цепь, и 2-я модель на базе новых электродвигателей на постоянных магнитах Д90-А-547У.1.81 мощностью 130Вт. В электрических схемах полуавтоматов предусмотрена предварительная подача и задержка отключения защитного газа на 1,5–3с после размыкания кнопки «Пуск».

**Полуавтомат типа «Гранит 3УЗ»** конструктивно подобен полуавтомату А-547Ум. Состоит из переносного подающего механизма, в котором размещены привод на базе электродвигателя Д90Н, газовый клапан, реостат регулировки скорости подачи проволоки и катушка с электродной проволокой на 5кг. Питание электрической схемы полуавтомата производится от дополнительного источника тока на 36В. В электрической схеме предусмотрены предварительная подача защитного газа и задержка отключения газового клапана на 1,5–3с после отпущения кнопки «Пуск». В качестве источника тока могут использоваться выпрямители ВДГ25–302, ВДГ25–401, ВДУ25–401, ВДУ25–506 или ВДУ–506. Подобные полуавтомату «Гранит 3УЗ» полуавтоматы «КИГ–400» изготавливаются Каховским заводом электросварочного оборудования КЗЭСО.

**Полуавтомат А825М** состоит из переносного механизма подача электродной проволоки открытого типа, на раме которого размещена катушка с электродной проволокой массой до 15 кг и отдельного пульта управления. Питание электрической схемы производится от напряжения сварки. Полуавтомат может комплектоваться выпрямителями ВС–300Б, ВДГ25–401.

**Полуавтомат 547Д1** состоит из переносного механизма подачи электродной проволоки типа А-547УМ и выпрямителя И-198, в котором смонтирована электрическая схема полуавтомата.

**Полуавтоматы ПДГ 508 и ПДГ 508М** изготавливаются Каховским заводом электросварочного оборудования КЗЭСО (г. Каховка Украина). Полуавтоматы состоят из переносного механизма подачи электродной проволоки с катушкой для проволоки открытого типа и блока управления. Механизм подачи с приводом от асинхронного электродвигателя, ступенчатым изменением скорости подачи электродной проволоки от 120 до 1200 м/ч. Полуавтомат ПДГ 508 с 2-х роликовым узлом подачи электродной проволоки, а ПДГ 508М с 4-х роликовым узлом подачи проволоки. На катушке помещается до 12 кг электродной проволоки.

**Двухрежимные полуавтоматы А929М, КИП18 и ПДГ–600** предназначены для сварки на двух заранее установленных режимах с переключением режимов кнопкой «Пуск», установленной на ручке держателя. Подающие механизмы полуавтоматов переносные толкающего типа. Электрические схемы выполнены в отдельных корпусах. Полуавтоматы могут комплектоваться выпрямителями ВДГ25–401, ВДГ25–506, ВДГ25–630 и КИ506 с плавным дистанционным регулированием напряжения.

**Полуавтомат ПДГИ–401 с выпрямителем ВДГИ–401** предназначен для импульсно-дуговой сварки в аргоне и в смеси Ar+CO<sub>2</sub> до 15% проволокой диаметром 0,8–1,6 мм. Изготавливается ОАО «СЭЛМА».

В последние годы на предприятиях все шире применяют полуавтоматы зарубежных фирм (Fronius, Messer Grisehm, ESAB, Kemppi, SEMONT и др.) Технические данные аппаратов указывают обычно в соответствии с EN60974–11. Однако, названия аппаратов и цифровое обозначения произвольные и, во многих случаях, не соответствуют току сварки при ПВ 60% при напряжении сети 380 В, как требуется согласно ГОСТ 13821 и ГОСТ 18130. Модели последних разработок инверторные и универсальные, содержат программы управления, в которых заложены оптимальные сочетания напряжений и токов сварки, реализуемых при номинальном напряжении сети питания, которая в Европе установлена 400В. Программы заданы для нескольких технологических вариантов сварки. Однако, реализация таких программ требует соблюдения высоких требований, предъявляемых нормами ISO EN, к питающей сети переменного тока, качеству сборки соединений, качеству сварочных материалов, чистоте свариваемых кромок и минимальных потерь в сварочной цепи согласно EN60974–11.

Эффективность применения полуавтоматов в цехах в большой степени определяется организацией рабочего места сварки, использованием вспомогательного оборудования для установки свариваемых изделий в наиболее удобное для сварки положение. Механизмы подачи проволоки и катушки с проволокой устанавливаются на поворотных консолях, подвижных тележках, перемещающихся по направляющим. Важным является также организация обеспечения сварочных постов чистой электродной проволокой на сменных катушках, запасом сменных токоподводов, смесями для защиты сопел от прилипания мелких брызг, централизованного питания защитными газами. Необходима также организация в цехах службы ремонта сменных держателей с гибкими шлангами.

Примером использования полуавтоматов для сварки протяженных швов, является **устройство АКР 334**, представляющее собой тележку с приводом от механизма Д90, питаемого от напряжения сварки. Тележка перемещается по штанге длиной 1470 мм. Масса тележки 6,5 кг. Штанга крепится к кромке соединения постоянными магнитами. На тележке закрепляется держатель полуавтомата, который гибким шлангом соединен с механизмом подачи электродной проволоки полуавтомата А–547УМ. Устройство имеет механизм копирования свариваемой кромки, который может выполнять также поперечные колебания элек-

трода с амплитудой до 10 мм. Применяется устройство при сварке наклонных и вертикальных швов, корневых швов на металле средних и больших толщин.

**Установки для автоматической сварки.** К установкам для автоматической сварки относят аппараты, у которых весь сварочный цикл, в том числе и перемещение сварочной горелки или свариваемого изделия выполняется аппаратом.

Установки для сварки однотипных деталей мелкосерийного и индивидуального производства состоят из сварочной головки с устройством для перемещения головки или манипулятора (вращателя) для перемещения свариваемого изделия, источника питания током и газовой аппаратуры. В установках используют подвесные головки типа А1406 и самоходные головки А1416, перемещающиеся по направляющим, а также специальные многодуговые головки. Установки изготавливают на токи до 500А и до 1250А. В автоматах на токи до 500А применяется электродная проволока диаметром 1,2–2 мм, а на токи до 1250А диаметром от 2 до 5 мм. В качестве сварочных головок часто используют падающие механизмы полуавтоматов типа А–547УМ, А–825М, А–1197П, ПДГ–508, ПДГ–305, ПДГ–502 и др. Желательно, чтобы головки имели плавное регулирование скорости подачи проволоки, а источник питания обеспечивал плавное изменение и стабилизацию напряжения сварки. На сегодня в промышленности используется значительное количество сварочных установок, например: типа А–3 для сварки кольцевых швов диафрагм паровых турбин диаметром 924–1160 мм; типа А–95У для сварки тракторных колес; типа Р–922М для наплавки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей деталей диаметром до 645мм и длиной до 1200 мм. Установка Р–964 для сварки двух кольцевых швов на деталях диаметром от 20 до 300 мм и длиной обечайки до 1500 мм при горизонтальном расположении оси вращения.

**Станки-автоматы** применяют для сварки деталей серийного или массового производства.

**Станок-автомат типа Р–912** предназначен для сварки деталей с кольцевыми швами диаметром 4–280 мм при вертикальной оси вращения детали. Сварку ведут проволоками диаметром 0,8–1,4 мм на токах до 315 А. Станок состоит из сварочной головки с горелкой, трехпозиционного поворотного стола с вращающимися цанговыми зажимами, станины, в которой смонтирована электроаппаратура управления станком, вертушки с запасом электродной проволоки, источника питания и газовой аппаратуры. Установка и снятие деталей, а также поворот стола из одного положения в другое выполняются вручную. Электрическая схе-

ма станка проста и обеспечивает возможность выполнения сварки, но следующим циклам:

1) вручную начало и окончание сварки каждой детали производится оператором;

2) по полуавтоматическому циклу – начало сварки производится оператором, а окончание – автоматически реле времени;

3) по автоматическому циклу начало сварки задается конечным выключателем при установке стола в рабочее положение, а окончание автоматически реле времени.

**Станок-автомат У-73** предназначен для сварки амортизаторов автомобилей. Закрепление деталей, сварка и сброс спаренной детали производится автоматически.

Сварочные станки-автоматы успешно работают в поточных и автоматизированных линиях, обеспечивая высокое качество изделий.

**Сварочные автоматы-тракторы** представляют собой автоматы, перемещающиеся по свариваемому изделию.

**Сварочный автомат типа АДГ-502** предназначен для сварки на токах до 500А проволоками диаметром 1,2–2 мм. Масса автомат 58 кг без проволоки и проводов управления. Скорость подачи проволоки регулируется плавно от 120 до 700 м/ч, а скорость сварки от 12 до 120 м/ч.

**Сварочный автомат АДГ-601** предназначен для сварки на токах до 630 А проволоками диаметром 2–4 мм, скорость подачи изменяется от 60 до 360 м/ч; скорость сварки регулируется плавно от 12 до 120 м/ч. Масса автомата 85 кг.

**Комплект из двух малогабаритных сварочных автоматов А-1698** предназначен для сварки угловых швов катетом 4–8 мм в нижнем положении. Сварка ведется проволоками диаметром 1–1,4 мм на токах до 350 А, скорость сварки изменяется ступенчато в пределах 15–45 м/ч. Автомат обеспечивает копирование швов и имеет правое и левое расположения сварочной горелки, что позволяет устранить недовары в конце соединения. Габаритные размеры автомата 420x220x280 мм, масса (без электродной проволоки) 15 кг. На катушке помещается 4–5 кг проволоки.

**Сварочный автомат А-1711** предназначен для сварки угловых швов катетом 4–8 мм в нижнем положении при переменной кривизне вертикальной полки высотой 40–125 мм. Сварка ведется проволоками диаметром 1–1,4 мм на токах до 350 А. Скорость сварки изменяется от 15 до 30 м/ч. Автомат обеспечивает копирование соединения с помощью копирных роликов и плавающей подвески сварочной горелки. Размеры автомата 390x330x380 мм, масса (без электродной проволоки) 20 кг. На катушке помещается 4–5 кг проволоки.

**Трактор ТС-42** предназначен для сварки стыковых и нахлесточных соединений сталей средних толщин на токах до 500 А сплошной и порошковой проволокой диаметром от 1,2 до 4,0 мм.

**Трактор ТС-49** предназначен для сварки стыковых и нахлесточных соединений сталей толщиной от 0,5 до 3,0 мм на токах до 300 А сплошной и порошковой проволокой диаметром от 0,8 до 1,2 мм. Сварка выполняется между двумя медными роликами, сжимающими свариваемые листы.

Для использования при сварке в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2+\text{O}_2$ , и  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$  тракторов типа ТС-17М и ТС-17Р разработаны дополнительные узлы-приставки: А-534 для сварки проволоками диаметром 1,6–4 мм; А-61 для сварки проволоками диаметром 0,8–1,2 мм; А-770 и А-931 для сварки проволоками диаметром 1,4–4 мм с поперечными колебаниями электрода.

**Сварочные роботы** (рис. 6.16) – установки для автоматической сварки изделия, управляемые электронными системами по заранее заданным программам или по программам с автокоррекцией. Системы электронного управления обеспечивают заданную траекторию перемещения сварочной горелки вдоль шва. Такие роботы называют манипуляторами. Более сложные обеспечивают также быструю смену технологических процессов сварки узлов и изменение режима сварки.



*Рис. 6.16. Сварочные роботы*

Роботы, реализующие технологические процессы сварки отнесены Международной федерацией роботов к классу IFK160.

В настоящее время работы, реализующие технологии автоматической сварки в защитных газах применяются в автомобилестроении, сельхоз и строительно-дорожном машиностроении [112]. Из технологических процессов наиболее часто применяется сварка сталей в смесях  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  (20–25%) электродными проволоками диаметром 1,2 мм на токах струйного переноса электродного металла или импульсно-дуговая сварка в смесях  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  (10–15%), реже – сварка в  $\text{CO}_2$  порошковыми проволоками на режимах, при которых имеет место минимальное разбрызгивание и хороший внешний вид швов. После сварки каждого шва часто производится откусывание лишнего выбега электродной проволоки и оплавленного конца проволоки покрытого шлаком, что обеспечивает хорошее начало сварки следующего шва. После сварки нескольких деталей в программу работы включают операции по очистке сопла от брызг и опрыскивание сопла составом, уменьшающим прочность прилипания брызг к соплу и токоподводу горелки. Предусматривается регулярная замена изношенного токоподводящего наконечника горелки.

**Оборудование для хранения, транспортировки и использования защитных газов.** В промышленности применяют следующие системы обеспечения производств защитными газами: индивидуальную; централизованную с питанием от рампы баллонов и подачей защитного газа к сварочным постам по трубопроводу; централизованную с питанием от изотермической емкости и подачей газа по трубопроводу; централизованную с питанием от заводской станции защитного газа и подачей газа по трубопроводу (рис. 6.17).

При индивидуальной системе каждый сварочный пост питается от одного или нескольких баллонов с защитным газом, которые располагают у сварочного поста. Если сварочный пост подвижный, то баллоны перемещают вместе с постом.

В комплект газовой аппаратуры при индивидуальной системе питания газом входят: баллон с запасом защитного газа, понижающий редуктор, расходомер и газовый клапан-экономизатор. При питании углекислым газом перед понижающим редуктором устанавливают подогреватель газа, а при использовании влажного углекислого газа после редуктора ставят осушитель газа. Обычно газовый клапан-экономизатор ставят в сварочном аппарате.

При централизованном питании от рампы с баллонами (рис. 6.17, в) сварочные посты питаются газом от цехового трубопровода, подключенного к группе баллонов. В комплект системы входят: две группы баллонов, перепускная рампа с редукторами, понижающими давление газа от высокого в баллонах до установленного рабочего в трубопроводе, цеховой трубопровод, понижающие редукторы на каждом свароч-

ном посту, расходомеры и газовые клапаны-экономизаторы также на каждом сварочном посту.

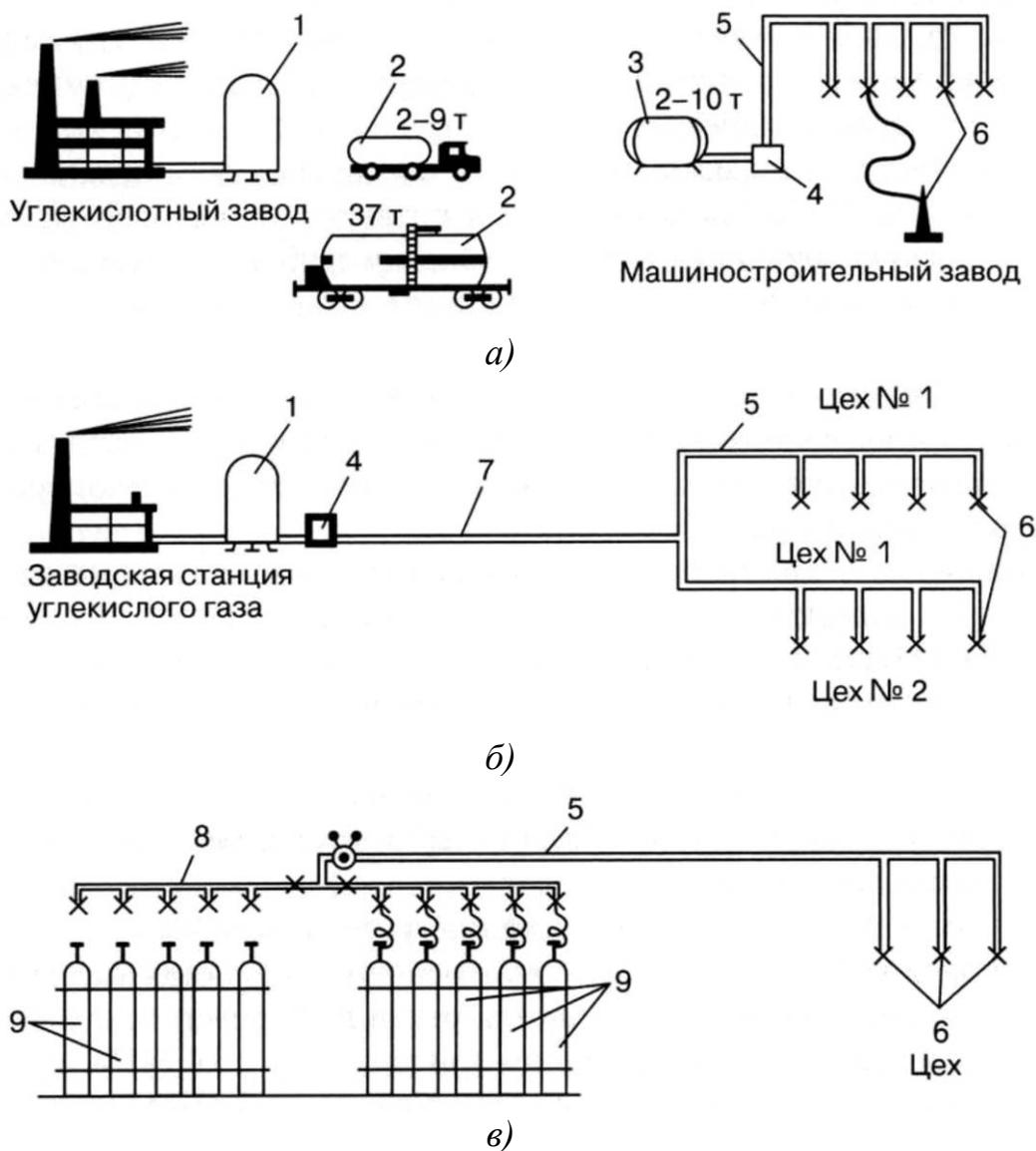


Рис. 6.17. Схемы центрального обеспечения сварочного производства углекислым газом от: а) изотермической емкости; б) заводской станции углекислого газа; в) перепускной рампы с баллонами (1 – промежуточное хранение газа; 2 – транспортная емкость; 3 – стационарная емкость; 4 – газификационная установка; 5 – цеховой трубопровод; 6 – сварочные посты; 7 – магистральный трубопровод; 8 – перепускная рампа; 9 – баллоны с газом)

При централизованном питании от изотермической емкости (рис. 6.17, а) сварочные посты питаются газом от цехового трубопровода,

подключенного к изотермической емкости с газификационной установкой. В комплект системы входят: стационарная изотермическая емкость, газификационная установка, цеховой трубопровод, понижающие редукторы, расходомеры и газовые клапаны-экономизаторы на каждом сварочном посту.

При централизованном питании от заводской станции защитного газа (рис. 6.17, б) сварочные посты питаются от цехового трубопровода, подключенного к магистральному трубопроводу, идущему от станции. В комплект данной системы входят: собственно станция защитного газа, промежуточное хранилище газа, магистральный трубопровод, понижающие редукторы, расходомеры и газовые клапаны-экономизаторы на каждом посту.

**Баллоны.** Для хранения и транспортировки сжатых и сжиженных защитных газов используют стальные баллоны ( $P_y < 20 \text{ МПа}$ ), изготавливаемые по ГОСТ 949–57. Газ в этих баллонах находится при температуре окружающего воздуха. Промышленность выпускает баллоны емкостью от 2 до 55 л. Для транспортировки аргона, гелия, углекислого газа и смесей газов используют, в основном, баллоны емкостью 40 л. Как было отмечено, аргон, гелий, и их смеси находятся в баллонах в газообразном состоянии при давлении 15 МПа, а углекислый газ в сжиженном состоянии при давлении 6–7 МПа. В баллон емкостью 40 л при давлении 15,0 МПа и температуре +20 °С накачивают 6 м<sup>3</sup> аргона, гелия или смеси Ar+CO<sub>2</sub>. В такой же баллон при температуре +20 °С помещается 25 кг жидкой углекислоты. При испарении 25 кг жидкой углекислоты образуется 12,6 м<sup>3</sup> углекислого газа.

Баллоны окрашивают в строго определенные цвета для углекислоты в черный цвет, аргона и смесей аргона в серый цвет и на них делают надпись согласно ГОСТ 949–57, на баллоне с углекислотой «Углекислота», на баллоне с аргоном «Аргон». Отбор аргона, гелия и их смесей с углекислым газом из баллонов производится через понижающий редуктор при давлении 0,2–1,5 МПа в зависимости от необходимого расхода. Для получения углекислого газа необходим подвод теплоты к жидкой углекислоте и ее испарение. При естественном обогреве баллона окружающим воздухом с температурой 22–25 °С можно обеспечить непрерывный отбор 20–25 л углекислого газа в минуту. При большем отборе газа происходит охлаждение жидкой углекислоты и снижение давления в баллоне. При снижении давления в баллоне ниже 0,528 МПа (тройная точка) жидкая углекислота превращается в сухой лед и процесс газификации практически прекращается. Поэтому в случае необходимости получения большего отбора газа при температурах менее 20 °С, а также обычных расходов при пониженных температурах

необходимо питать пост от двух и более баллонов. В отдельных случаях производят искусственный подогрев баллонов.

Во избежание взрыва баллона, сопровождающегося большой разрушительной силой, следует особенно тщательно соблюдать «Правила устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением» и принимать меры, предупреждающие перегрев баллонов и превышение давления в них.

**Подогреватель газа.** При сварке в углекислом газе используют подогреватели, обычно электрические, высокого давления. Для безопасной работы подогреватели должны питаться напряжением 20–36 В. На практике находят применение подогреватели двух типов: в первом, в виде змеевика, газ нагревается при прохождении по медной трубке, обогреваемой электрической спиралью, во втором углекислый газ проходит по каналам в керамической вставке, в которые помещен электронагревательный элемент в виде нихромовой спирали. Во избежание перегрева редуктор следует отделить от подогревателя переходной трубкой длиной 100 мм.

**Редукционные вентили (редукторы).** Редукторы предназначены для понижения давления газа до рабочего, при котором газ поступает в горелку, и поддержания постоянным рабочего давления [19, 111]. Для сварки в защитных газах при индивидуальном питании от баллонов, когда расход газа сравнительно небольшой (4–40 л/мин), желательно применять редукторы обратного действия малой пропускной способности с минимальной ценой деления манометра низкого давления и с наиболее чувствительным регулированием давления. Для сварки в защитных газах серийно выпускают редукторы (табл. 6.5) [111]. Эти редуктора одновременно являются расходомерами, для этого в их комплект введены сменные вставки (дюзы) с различным диаметром отверстий.

Таблица 6.5

*Технические характеристики редукторов, используемых при сварке в защитных газах*

Тип	Давление на входе, МПа	Пропускная способность, л/мин	Назначение
АР–40–2* АР–40–2ДМ	0,8–20	5–40	Для Ar и смесей (двухкамерный)
АР–40/У–30ДМ	0,3–20	5–30	Для Ar и CO <sub>2</sub> (двухкамерный)
УР–6ДМ	0,8–10	5–30	Для CO <sub>2</sub> (двухкамерный)
У–30–2ДМ	0,8–10	5–30	

ДЗР-1-59М	15	2,5–55	
У-30-2*, У-30-П2*, У-30ДМ	0,8–10	5–30	Для CO <sub>2</sub> (с подогревателем, однокамерный)
АР-150-2*	1,5–2,0	150	Для Ar (рамповый)
Примечания. 1 Условный проход резинотканевого рукава 9 мм. 2. Знаком* отмечены редукторы производства Барнаульского завода «Автоген-маш» (РФ), остальные ДОНМЕТ			

Для сварки в защитных газах часто используют также кислородные редукторы типов РК-53, РК-53Б, РКД-8 и др. Однако при малых расходах газа кислородные редукторы работают нестабильно. Для улучшения работы кислородных редукторов типа РК-53 рекомендуется устанавливать на выходе из редуктора дроссельную шайбу с малым отверстием (0,6–1,0 мм), повышающую давление в камере низкого давления. В этом случае при замене кислородного манометра низкого давления ацетиленовым манометром на 6 кгс/см<sup>2</sup> редуктор может быть использован как редуктор-расходомер.

При централизованном питании сварочных постов газом на входе в трубопровод устанавливают кислородный рамповый редуктор типа КРР-50 или КРР-61 и на каждом сварочном посту ставят редуктор низкого давления, например типа РД-1, РД-1БМ, РДК-0 или РДК-1-00.

**Расходомеры газа.** При сварке используют расходомеры поплавкового типа и расходомеры дроссельного типа.

**Расходомер поплавкового типа или ротаметр** состоит из стеклянной трубки с внутренним коническим каналом. Трубка всегда должна быть расположена строго вертикально широким концом вверх. Внутри трубки помещен поплавок, который свободно в ней перемещается. Газ подводят к нижнему концу трубки и отводят от верхнего. При прохождении по ротаметру газ поднимает поплавок до тех пор, пока зазор между поплавком и стенкой трубки не достигнет такой величины, при которой напор струи газа уравнивает массу поплавка. Чем больше расход газа, тем выше поднимается поплавок. Каждый ротаметр имеет индивидуальный градуировочный график, на котором показана зависимость между делениями шкалы ротаметра и расходом воздуха. Изменяя массу поплавка, можно изменить пределы измерения расхода газа. Поплавки изготовляют из эбонита, дюралюминия, нержавеющей стали.

**Расходомер дроссельного типа** (табл. 6.6) основан на принципе измерения перепада давления в камере до и после дросселирующей диафрагмы с отверстием малого размера. При прохождении газа через малое отверстие в зависимости от расхода до и после диафрагмы устанавли-

ливается различное давление. По перепаду давления судят о расходе. На каждый расходомер и газ строят индивидуальный тарировочный график. Пределы измерения расходов изменяют, изменяя отверстия в диафрагме.

Таблица 6.6

*Ориентировочные пределы измерений расхода воздуха*

Тип расходомера	Материал поплавка	Пределы измерения, л/мин
РС-3А	Нержавеющая сталь	0,3–4,0
РС-3	Эбонит	0,67–6,0
	Дюралюминий	1,67–10,5
	Нержавеющая сталь	2,0–20,0
РС-5	Эбонит	10–66
	Дюралюминий	16–105
	Нержавеющая сталь	24–170

**Газовый клапан** используется для экономии защитного газа. Клапан устанавливают как можно ближе к сварочной горелке. Наибольшее распространение получили электромагнитные газовые клапаны. В полуавтоматах находят применение также газовые клапаны, встроенные в ручку держателя. Газовый клапан необходимо включать так, чтобы были обеспечены предварительная до зажигания дуги подача газа, а также последующая, после обрыва дуги, подача газа до полного затвердевания ванны жидкого металла. Необходимо предусматривать также включение подачи газа без сварки, что необходимо для заполнения защитным газом газовой системы аппарата и удаления воздуха из начала сварного соединения.

**Осушители газа** применяют главным образом при сварке в углекислом газе. В промышленности используют осушители высокого и низкого давлений. Осушитель высокого давления устанавливают до понижающего редуктора. Он имеет малые размеры и требует частой замены влагопоглотителя. Осушитель низкого давления устанавливают после понижающего редуктора. Он часто имеет значительные размеры, не требует частой замены влагопоглотителя. Такой осушитель одновременно является ресивером газа и повышает равномерность подачи газа. В качестве влагопоглотителя используют силикагель и алюмогель, реже медный купорос и хлористый кальций. Силикагель и медный купорос, насыщенные влагой, поддаются восстановлению путем прокалки при температуре 250–300 °С.

**Перепускные рамповые системы.** При сварке в защитных газах находят применение перепускные рампы двух типов (рис. 6.18): первый для подачи аргона, гелия и смеси аргона с углекислым газом и углекислого газа, находящихся в баллонах в газообразном виде, и углекислого газа с газификацией двуокси углерода ( $\text{CO}_2$ ) в баллонах и второй тип для подачи углекислого газа с газификацией в испарителе (газификаторе).

Основными частями обеих систем являются собственно перепускные рампы и трубопровод, по которому газ подводится к сварочным постам. Эти трубопроводы во всех системах централизованного питания практически одинаковы.

Перепускная рампа первого типа (для аргона, гелия и смесей аргона с гелием и аргона с углекислым газом) конструктивно выполнена по той же схеме, что и кислородная рампа (рис. 6.18, а) и состоит из двух групп баллонов 1 и 2 по 5–20 штук в каждой, коллектора 5 со змеевиками 3 для подключения баллонов к коллектору, перекрывающих вентилей 4 манометра 6 и рампового редуктора 7, обычно кислородного. Группы баллонов попеременно подключают к коллектору 5 для питания его газом.

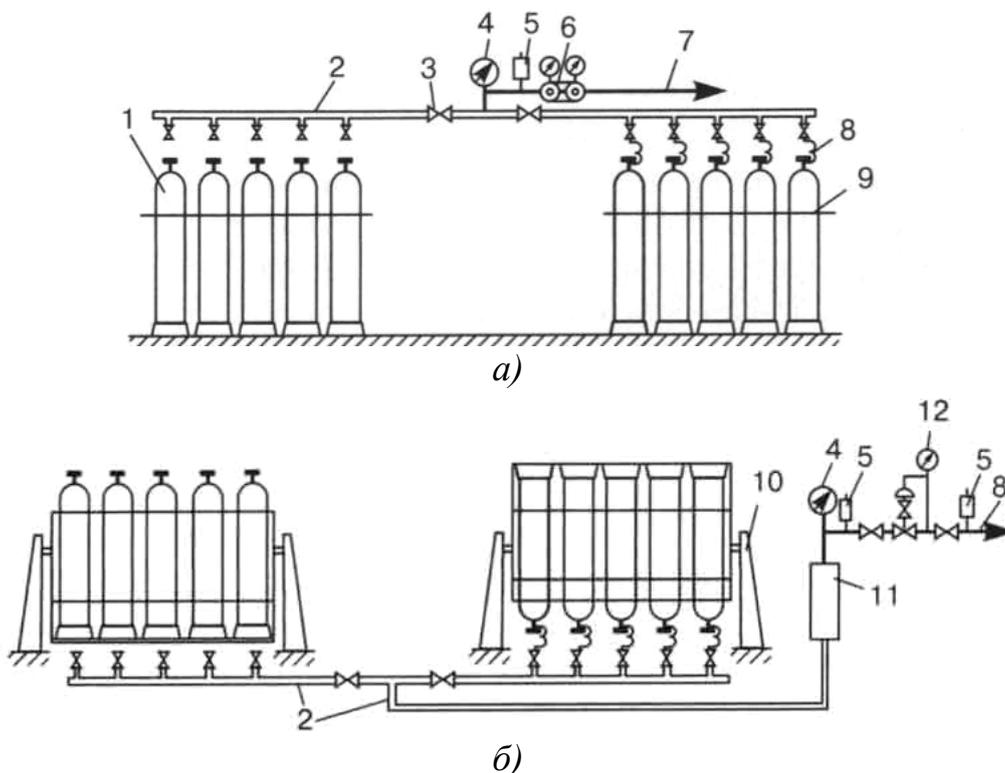


Рис. 6.18. Перепускные рамповые установки: а) для инертных газов; б) для углекислого газа

Газовый трубопровод выполняют в соответствии с нормами на устройство и эксплуатацию трубопроводов. Давление газа в трубопроводе устанавливают в зависимости от необходимого расхода газа в пределах 0,3–0,5 МПа. На каждый сварочный пост на трубопроводах с давлением 0,3–0,5 МПа устанавливают понижающий редуктор типа РД или РКД и расходомер. Трубопроводы для подачи аргона окрашивают в серый цвет, гелия – в коричневый, азота, углекислого газа и аргона с кислородом – в черный.

Для получения углекислого газа, транспортируемого в баллонах, используют рампу второго типа. Баллоны устанавливают на отдельные переворачивающиеся кантователи. Обе группы поочередно подключают к коллектору. Жидкая двуокись углерода из баллонов поступает в коллектор, а затем в испаритель (газификатор), где подогревается и превращается в газ, который по трубопроводу подается к сварочным постам. Такая рампа обеспечивает получение и подачу в трубопровод углекислого газа до 0,45 МПа.

Цеховой трубопровод для подачи  $\text{CO}_2$  выполняют таким же, как для подачи кислорода. Для обеспечения надежной подачи  $\text{CO}_2$  к сварочным постам при большой длине трубопровода на входе в трубопровод устанавливают кислородный рамповый редуктор типа КРР–50 или КРР–61 и на каждом сварочном посту ставят редуктор низкого давления, например типа РД–1, РД–1БМ, РДК–00 или РДК–1–00. Трубопроводы для  $\text{CO}_2$  нужно обязательно выполнять с уклонами и установкой влагоотстойников. Это вызвано тем, что в баллонах с двуокисью углерода может содержаться значительное количество влаги. Для уменьшения не потерь  $\text{CO}_2$  на каждом выходном штуцере трубопровода необходимо ставить запорный вентиль и обратный клапан-нипель такого же типа, как на трубопроводах сжатого воздуха. Трубопроводы для подачи  $\text{CO}_2$  и его смесей окрашивают в черный цвет.

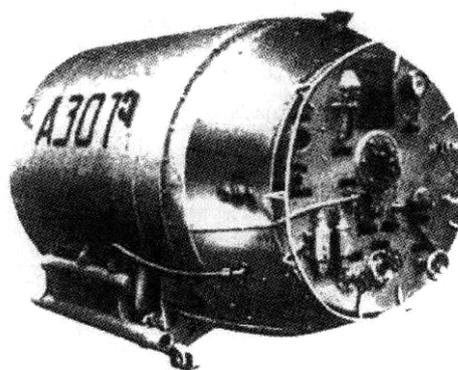
**Системы на основе изотермических емкостей** состоят из стационарной емкости накопителя, испарителя-газификатора и трубопровода подачи защитного газа к сварочным постам. Для транспортирования и хранения сжиженной переохлажденной двуокиси углерода используют транспортные емкости типа ЦЖУ и стационарные емкости накопителя типа НЖУ (табл. 6.7). Перелив сжиженной двуокиси углерода из транспортной емкости в стационарную осуществляют самотеком за счет разности уровней размещения транспортной и стационарной емкостей или специальным насосом типа УПЖУ. Такой насос также смонтирован на платформе транспортных емкостей ЦЖУ–3, ЦЖУ–6 и ЦЖУ–9.

Таблица 6.7

*Техническая характеристика систем с изотермическими емкостями для углекислого газа*

Параметр	Транспортные		Стационарные
	ТРЖК–7М	ЦЖУ 6,0–1,8	ЦЖУ 8,0–2,0
Номинальный объем, м <sup>3</sup>	3,0	6,0	8,0
Масса жидкой СО <sub>2</sub> , кг	2950	6000	7850
Масса цистерны без СО <sub>2</sub> , кг	2200	3350	5100
Максимальное рабочее давление, МПа	2,0	1,8	2,0
Срок хранения, сутки	10	5	12
Рабочая температура, °С	–35...–45	–35...–45	–35...–45
Габаритные размеры, м	3,7x1,8x1,9	6,6x2,5x3,2	5,2x2,2x2,6

Для транспортирования и газификации аргона и смеси аргона с кислородом в сжиженном виде используют установки АГУ–2М, АГУ–8К, ЗТК–8/25, ЗТК–16/25 (рис. 6.19) и железнодорожные емкости типа 8Г/13, а также газификаторы ГКХ–8/16–2000, ГКХ–1/16.



*Рис. 6.19. Изотермическая емкость для транспортировки и хранения аргона и азота*

**Заводские углекислотные станции.** На ряде крупных машиностроительных заводов, потребляющих большое количество углекислоты, построены заводские углекислотные станции. Большинство углекислотных станций работает на принципе отбора углекислого газа из дымовых газов различных котельных (сжигающих природный газ, уголь, мазут и др.). Для получения углекислого газа используют моноэтаноламин. Действующие станции построены по следующим схемам. На ряде спиртовых заводов построены установки для получения двуокси углерода из отходящих газов брожения, содержащих почти 100% двуокси углерода. При нормальных температурах и высоком давлении (5–7 МПа) двуокись углерода хранят и транспортируют в баллонах высокого давления в сжиженном состоянии, газифицируют и подают к сварочным постам в газообразном виде по трубопроводу.

При получении  $\text{CO}_2$  в переохлажденном состоянии (минус  $45^\circ\text{C}$ ) при давлении 1,2–1,6 МПа двуокись углерода хранят и транспортируют в изотермических емкостях, газифицируют и подают к сварочным постам по трубопроводу в газообразном виде.

На ряде металлургических и районных кислородных заводах (Днепровском, Киевском, Алчевском) построены установки для получения аргона, аргона с кислородом, а также смесей аргона с кислородом и углекислым газом. Аргон с кислородом, аргон, кислород, азот поставляют в газообразном состоянии в баллонах в газообразном состоянии при давлении 15 МПа и в изотермических цистернах в жидком переохлажденном состоянии.

Смеси аргона с углекислым газом поставляют в баллонах при высоком давлении 15,0 МПа. Или смесь получают на заводах потребителей смешивая Ar и  $\text{CO}_2$ , поставляемых в отдельных баллонах, или отдельных изотермических емкостях. При поставке Ar и  $\text{CO}_2$  в отдельных изотермических емкостях смешивание производят после газификации газов в специальных смесителях, с последующей подачей смеси по газопроводу при давлении 0,3–0,5 МПа и снижении давления газа на каждом сварочном посту редукторами типа РД или РКД и обеспечении роста расходами.

Рациональные области применения указанных систем зависят от конкретных условий сварочных производств [19]. Так, при небольшом числе сварочных постов (например, до 10), разбросанных на значительной территории цеха или обслуживающих большую площадь цеха, целесообразно использовать индивидуальное питание постов защитным газом. При небольшом числе сварочных постов (например, до 10), сосредоточенных на одном участке цеха или обслуживающих небольшую площадь, целесообразно организовывать централизованное питание постов защитными газами. При числе сварочных постов более 10 во всех случаях целесообразно организовать централизованное питание сварочных постов защитными газами. При этом предпочтение следует отдавать питанию трубопровода от изотермических емкостей с автоматической газификационной установкой. Для преобладающего числа случаев такая система является оптимальной. Эта система была принята основной в обеспечении предприятий углекислым газом.

Учитывая общее большое потребление углекислого газа, желательна следующая порайонная организация: сварочное предприятие оборудует у себя одну или несколько небольших стационарных емкостей (на 4–10 т) с автоматической испарительной газифицированной установкой и трубопровод, подводящий углекислый газ к сварочным постам. Доставку углекислоты на машиностроительный завод осуществ-

ляет фирма материально-технического обеспечения своей транспортной (автомобильной или железнодорожной) изотермической емкостью, транспортные емкости заправляются от районного межсезонного хранилища. Районное хранилище, в свою очередь, получает углекислоту от близлежащих углекислотных заводов. Благодаря устройству районных межсезонных хранилищ могут быть полностью использованы резервы производства углекислоты.

Организация обеспечения углекислым газом, при которой заводы-потребители углекислоты сами содержат у себя транспортные емкости и вынуждены получать углекислоту на углекислотных заводах, недостаточно совершенна. Заводские углекислотные станции строят только в отдельных случаях для крупных потребителей углекислоты, если в данном районе (в радиусе 250–350 км) отсутствуют свободные ресурсы углекислого газа. Но и в этих случаях предпочтение следует отдавать строительству районных углекислотных станций, которые будут обеспечивать углекислым газом весь район.

## ГЛАВА 7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Сварку в защитных газах и их смесях плавящимся электродом проводят открытой дугой, которая в большинстве случаев питается от источников тока, подключенных к сети переменного тока напряжением 220–380 В, и горит в среде защитного газа. Поэтому при выполнении сварочных работ необходимо обеспечить защиту сварщика от поражения электрическим током, светового, ультрафиолетового и теплового излучения дуги, воздействия электромагнитных полей, от ожогов брызгами расплавленного металла, отравления вредными парами и газами, выделяющимися из зоны сварки, от травмирования подвижными частями оборудования и баллонами с защитным газом при их падении и взрывах.

Поражение человека электрическим током происходит при прикосновении сварщика к токоведущим открытым частям сварочных проводов и аппаратуры, находящимся под высоким напряжением (рис. 7.1). При прохождении через тело тока силой более 0,05 А происходит судорожное сокращение мышц и гидролиз крови. При этом в крови образуются сгустки-тромбы, которые, отрываясь через некоторое время при неблагоприятных обстоятельствах, могут привести к смертельному исходу. Токи силой более 0,1 А смертельно опасны. Величина тока определяется напряжением между точками прикосновения и сопротивлением образовавшейся цепи.

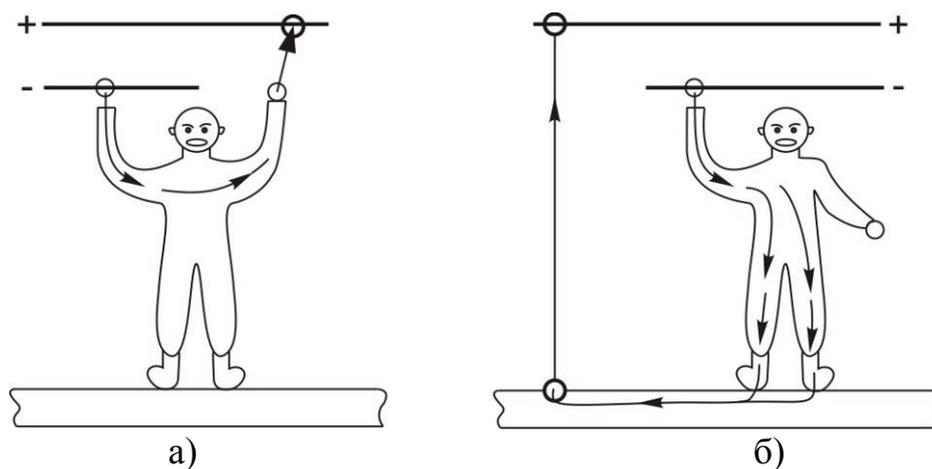


Рис. 7.1. Схемы прикосновения сварщика к линиям, находящимся под повышенным напряжением

Сопротивление тела человека зависит от многих факторов (усто- ленности, состояния здоровья, наличия в организме алкоголя, влажно- сти и грубости кожи и др.) и лежит в пределах от 20000 Ом при сухой коже до 500–1000 Ом при влажной потной коже [19]. Для защиты от по- ражения электрическим током применяют защитную изоляцию, защит- ные корпуса оборудования и их заземление, если они электропроводны, заземление столов сварщика и свариваемого изделия, а также устройст- ва автоблокировки, устройства снижения напряжения до безопасной ве- личины, зависящей от условий, в которых выполняется сварка. По ис- пользуемым средствам защиты, согласно ГОСТ 12.2.007.0–75 р.2 (см. Приложение 5) аппараты разделены на 5 классов (0; 0,1; 1; 11; 111). Сте- пень защиты, обеспечиваемая оболочкой (корпусом), от доступа к опас- ным частям, попадания твердых предметов и воды, согласно ГОСТ 14254–96 обозначается кодом «1Р Х1 Х2» с двумя цифрами, где Х1 оп- ределяет защиту от контакта с опасными токоведущими и подвижными частями, а Х2 обозначает степень защиты от попадания в оборудование воды (табл. 7.1).

Таблица 7.1

*Степени защиты по ГОСТ 14256–96*

Цифра	X1	X2
0	Нет защиты	Нет защиты
1	Защищено от твердых предметов диаметром более 50 мм и доступа внутрь на 100 мм до опасных частей	Защищено от вертикально падающих капель воды
2	Защищено от твердых предметов диаметром более 12,5 мм и доступа внутрь на 80 мм до опасных частей	Защищено от вертикально падающих капель воды при наклонах оболочки до 15° от вертикали
3	Защищено от твердых предметов диаметром более 2,5 мм и доступа внутрь на 100 мм до опасных частей	Защищено от брызг воды, падающих в направлениях до 60° от вертикали
4	Защищено от твердых предметов диаметром более 1 мм и доступа внутрь на 100 мм до опасных частей	Защищено от брызг воды, падающих в любом на- правлении

Величина безопасного напряжения зависит от внешних условий, в которых выполняется сварка. С точки зрения опасности поражения че- ловека электрическим током, согласно Правилам устройства электроус- тановок (ПУЭ), различают:

- помещения с повышенной опасностью;
- особо опасные помещения и работу на открытом воздухе или под навесами;
- помещения без повышенной опасности.

В соответствии с этим к сварочным аппаратам для дуговой сварки предъявляют требования по ограничению напряжения холостого хода. Максимальные напряжения холостого хода источников тока при работе в различных условиях не должны превышать значений, приведенных в табл. 7.2.

Таблица 7.2

*Допустимые максимальные напряжения холостого хода сварочного источника тока при номинальном напряжении сети 380±15 В*

Условия сварки	Напряжение холостого хода, В, не более	
	постоянного тока (среднее значение)	переменного тока (эффективное значение)
Среда с повышенной опасностью поражения электрическим током	113	42
Ручная сварка покрытыми электродами при сопротивлении внешней цепи более 200 Ом	12	12
Среда без повышенной опасности поражения током	113	80
Сварка с механическим перемещением горелки и повышенной защитой сварщика	141	100
Сварка под флюсом	4	120

К среде с повышенной опасностью поражения электрическим током относят:

- помещения или рабочее место с ограничением свободы движения сварщика, вследствие чего сварщик должен выполнять сварку в неудобном положении (на коленях, лежа и т. п.), при наличии физического контакта с открытыми токопроводящими элементами, в том числе при выполнении сварки на свариваемом изделии;
- помещение или рабочее место, полностью или частично ограниченное открытыми токопроводящими элементами, с которыми у сварщика существует большая вероятность неизбежного или случайного контакта;

- мокрое, влажное или горячее помещение, где влажность или конденсация влаги значительно уменьшает сопротивление кожи человеческого тела и изолирующие свойства вспомогательных защитных средств (рукавиц, коврика и др.);

- открытые территории, не защищенные от атмосферных осадков или защищенные только навесами.

Повышенная защита сварщика предусматривает: автоматическое отключение напряжения холостого хода после прекращения сварки и степень защиты от прикасания к токоведущим частям не ниже IP20 по ГОСТ 14254–96 или наличие устройства снижения напряжения холостого хода.

Если напряжение холостого хода сварочных источников тока превышает значения, приведенные в табл. 7.2, то источник тока должен быть оборудован устройством, снижающим напряжение холостого хода до допустимого уровня в течение 0,3 с для среды с повышенной опасностью и в течение 2 с для среды без повышенной опасности поражения током.

При сварке в защитных газах плавящимся электродом возникают низкочастотные магнитные поля. Сварочные источники тока имеют специальные устройства для гашения электромагнитного излучения. Однако электромагнитные поля создаются также сварочными кабелями и величина их значительна (рис. 7.2). Для уменьшения электромагнитного излучения рекомендуется располагать источник тока как можно ближе к месту сварки, использовать как можно более короткие сварочные провода; располагать прямой и обратный провода рядом и скреплять их; присоединять сварочный кабель к детали как можно ближе к месту сварки. Сварщику рекомендуется размещаться с одной стороны от сварочных кабелей. Лицам с электростимуляторами сердца и слуховыми аппаратами не рекомендуется заниматься сварочными работами. Работы на электросварочных установках должны выполняться с соблюдением требований ГОСТ 12.3.003–75 и ДСТУ 2456–93.

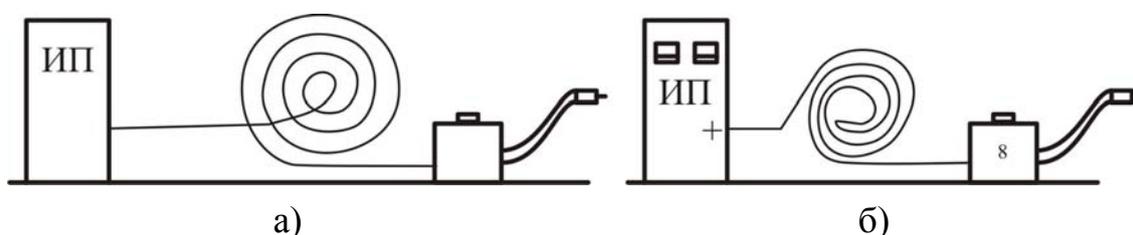


Рис. 7.2. Схемы размещения сварочных кабелей, создающих индуктивность сварочной цепи: а) повышенную; б) пониженную

Необходимо работать в сухих неповрежденных перчатках, пользоваться сухой обувью на толстой резиновой подошве без металлических гвоздей и сухой спецодеждой. При работе на свариваемом изделии убедитесь, что оно заземлено. Внутри котлов, резервуаров, в колодцах сварщик должен работать с подручным, использовать изолирующие резиновые коврики или сухие деревянные подмости.

Для защиты глаз и кожи от интенсивного излучения дуги предназначены специальные щитки, маски и шлемы, изготавливаемые из фибры или пластмассы с защитными светофильтрами. Необходимо учитывать, что интенсивность излучения дуги зависит от тока сварки и состава защитного газа. Так, интенсивность излучения при сварке в смесях аргона с кислородом и углекислым газом выше, чем в чистом  $\text{CO}_2$ . Класс светофильтра выбирают в зависимости от силы тока сварки и защитного газа (табл. 7.3). В целях учета индивидуальных особенностей сварщика рекомендуется опробовать светофильтры на один номер больше и один номер меньше.

Таблица 7.3

*Светофильтры серии С по ГОСТ 12.4.080–79, рекомендуемые для дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом*

Защитный	Сила сварочного тока, А														
	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900
газ $\text{CO}_2$	С1		С2	С3		С4	С5		С6		С7		С8	С9	С10
Аргон и его смеси	С3	С4	С5	С6			С7		С8			С9	С10	С11	С12

В последнее время выпускают маски и шлемы для сварщика со специальными светофильтрами типа «хамелеон», плотность которых при загорании дуги резко увеличивается и зависит от яркости излучения дуги, а после погасания дуги уменьшается, и светофильтр становится прозрачным. Очень хороши зеркальные светофильтры, отражающие ультрафиолетовые и тепловые лучи.

Вредно влияют на кожу человека не только прямые лучи, но и отраженное излучение. Для этого необходимо защищать тыльную сторону головы сварщика и глаза подсобных рабочих, а также снижать интенсивность отражения путем окраски стен и потолков матовыми красками серых или зеленых цветов с добавкой оксида цинка, уменьшающего отражение ультрафиолетовых лучей, использовать переносные щиты и ширмы. Для защиты подсобных рабочих, работающих вместе со свар-

щиками, рекомендуется использовать защитные очки с более светлыми светофильтрами, изготавливаемыми из стекла ТС–1 или ТС–8. Из них изготавливают светофильтры трех классов, отличающихся по оптической плотности. Если на открытом участке одновременно работает несколько сварщиков, то для защиты их от соседних дуг рекомендуется использовать переносные ширмы. В вечернее и ночное время рабочее место сварщика должно хорошо освещаться, поскольку частые и резкие переходы от света к темноте утомляют глаза сварщика.

Особое внимание следует уделять защите от пылегазовыделения, которое при сварке в защитных газах сравнительно велико [4, 6, 103]. Количество, а также состав пыли и газов зависят от рода защитного газа, свариваемого материала, режима сварки и других факторов. Под воздействием ультрафиолетового излучения вокруг дуги образуется озон, а при попадании в зону дуги воздуха – также оксиды азота.

Многие из компонентов сварочного аэрозоля оказывают вредное воздействие на человека, и предельно допустимые концентрации их оговорены санитарными нормами. Пыль – это мелкие (до 1 мкм) частицы сконденсировавшихся паров. Токсичность их зависит от состава и кристаллического строения. Наиболее высока концентрация компонентов аэрозоля в облаке дыма, поднимающегося из зоны сварки. Концентрация этих же компонентов в зоне дыхания сварщика зависит от расположения сварщика по отношению к дуге, объема помещения, в котором ведется сварка, и характера движения воздуха в месте сварки.

По характеру загрязнения атмосферы у места сварки можно выделить три характерных вида конструкций: открытые плоскостные, полужакрытые и закрытые. К первым можно отнести всевозможные плосколистовые и рамные конструкции, свариваемые в цехах объемом более 150 м<sup>3</sup>, где имеются хорошие условия для быстрого рассеяния выделяющегося сварочного аэрозоля; ко второму типу – конструкции с различными небольшими отсеками, в которых условия свободного рассеяния аэрозоля затруднены; к третьему – конструкции с замкнутыми отсеками небольшого объема (менее 10 м<sup>3</sup>), в которых происходит скопление аэрозоля и быстрое изменение состава атмосферы.

Вдуваемый в зону сварки СО<sub>2</sub> не ядовит, но часть углекислого газа, попадающая в зону дуги, под действием высокой температуры разлагается на кислород и оксид углерода СО – ядовитый газ. Оксид углерода образуется также вследствие выгорания углерода из стали. Выходя из зоны сварки в области низких температур, СО окисляется, образуя углекислый газ СО<sub>2</sub>. Углекислый газ обладает более высокой плотностью, чем воздух, и поэтому скапливается в нижних частях помещения, вытесняя воздух. Следовательно, там, где ведется сварка в СО<sub>2</sub>, необходи-

мо обязательно устраивать отсосы газа из нижних частей помещения. Особую предосторожность необходимо соблюдать при работе в закрытых отсеках и колодцах, устанавливая в них шланги приточной и вытяжной вентиляции из нижней части отсеков и колодцев.

Количество газов резко увеличивается при сварке окрашенного, покрытого жиром и антикоррозионными грунтами металла, а также покрытого эмульсиями для уменьшения прилипания брызг. При выборе растворителей для очистки кромок от жира нельзя использовать трихлорэтилен и дихлорэтан, так как при нагреве и взаимодействии с азотом возможно образование токсичного фосгена.

При сварке в защитных газах плавящимся электродом необходимо строго соблюдать требования пожарной безопасности, так как из зоны сварки вылетают искры и капли расплавленного металла, которые могут стать причиной пожара.

Следует также строго соблюдать Правила обращения с баллонами, содержащими защитные газы под высоким давлением. Нельзя допускать перегрева баллонов, резких толчков и ударов. В случае использования систем с подогревом баллонов с углекислым газом необходимо во избежание их взрыва укомплектовывать установки системами защиты от перегрева и превышения давления (термореле и газовым предохранительным клапаном).

Баллоны с защитными газами обязательно должны быть закреплены как на сварочных постах, так и в местах их хранения. Единичные баллоны необходимо транспортировать на ручных тележках или на специальных носилках. Запрещается переносить баллоны на руках. Редукторы, используемые для сварки в защитных газах, должны быть выкрашены в черный цвет. При отоплении редукторов и газовых систем запрещается применение открытого пламени. При эксплуатации систем централизованного питания защитными газами необходимо строго соблюдать специальные правила, оговоренные инструкциями.

## ГЛАВА 8. АТТЕСТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И СЕРТИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

В соответствии с Законом о защите прав потребителей продукция, на которую законодательными актами или нормативными документами установлены обязательные требования относительно безопасности для жизни, здоровья потребителей, их имущества, окружающей природы подлежит обязательной сертификации.

Работы по сертификации выполняют уполномоченные Органы сертификации, аккредитованные в Украинской системе аккредитации и «Системе сертификации УкрСЕПРО», в России – НАКС и РНТСО. Сертификация оборудования проводится согласно требованиям, предъявляемым Органами сертификации на основе анализа эксплуатационной и технической документации, идентификации и испытаний оборудования, а серийного производства – после обследования производства [113–116].

Испытания оборудования проводятся в независимых испытательных лабораториях, также аккредитованных в системе уполномоченных Органов сертификации. Сертификат соответствия на сварочное оборудование оформляется на основе анализов результатов работ. Орган сертификации предоставляет изготовителю право проставлять на изделия и на эксплуатационной документации знак Государственной сертификации с указанием регистрационного номера Органа сертификации, выполнившего работы по сертификации.

Добровольная сертификация проводится на соответствие всем требованиям безопасности согласно требованиям, предъявляемым действующими Органами сертификации, действующим на данное оборудование, и дополнительным требованиям, подтверждающим качество продукции.

Сертификаты, выданные в Украине, признаются в России, Белоруссии, Азербайджане, Армении, Грузии, Молдове, Казахстане, Киргизии и Таджикистане, с которыми заключены государственные соглашения. Соответственно в Украине признаются сертификаты, выданные государственными органами сертификации указанных стран, и взамен сертификатов выдаются свидетельства о признании, достаточные для выполнения таможенных процедур по ввозу оборудования. На рис. 8.1 показаны знаки сертификации, наносимые на сертифицированное оборудование в Украине, России, и знак «СЕ» принятый в Европе.

В странах Европы также действуют свои системы сертификации. Согласно общему положению, сертификация оборудования как средство подтверждения безопасности сварочного оборудования для жизни, здоровья, окружающей среды и имущества потребителя, проводится в соответствии с модульной схемой оценки безопасности. В результате в европейских странах изготовитель или поставщик оборудования под свою ответственность без испытаний оборудования или после испытаний на соответствие Нормам, действующим в Европе, ставит на изделиях знак «СЕ». Поэтому этот знак в Украине и в России не может гарантировать соответствия требованиям безопасности сварочного оборудования действующим требованиям. Европейская система сертификации предполагает периодические контрольные испытания образцов аппаратов, отбираемых из торговой сети или у изготовителя.

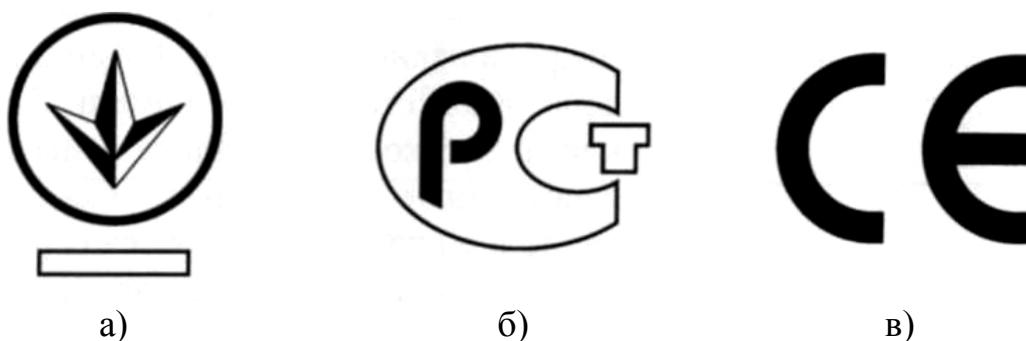


Рис. 8.1. Знаки обязательной сертификации:  
а) в Украине; б) в России; в) знак безопасности продукции в Европе

В Европе также действуют независимые органы сертификации и аккредитованные испытательные лаборатории, которые проводят испытания оборудования на соответствие требованиям безопасности согласно нормам, действующим в Европе, и выдают свой сертификат соответствия. При ввозе в страну сварочного оборудования и материалов из-за границы, подлежащих обязательной сертификации, необходима обязательная сертификация оборудования согласно требованиям, предъявляемым действующими Органами сертификации.

Поскольку в настоящее время сертификация является важным фактором в подтверждении безопасности и качества продукции, способности производств стабильно изготавливать качественную продукцию, а также важным аргументом при получении заказов на изготовление продукции, то по инициативе предприятий проводится добровольная сертификация любой продукции сварочного производства, технологических процессов сварки и системы качества производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А.И. и др. Технология и оборудование сварки плавлением, М-Л., Машиностроение, 1977. – 425с.
2. Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 80 с., с илл.
3. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с., с илл.
4. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение. – 1989. – 264 с.
5. Заруба И.И., Касаткин Б.С., Каховский Н.И., Потапьевский А.Г. Сварка в углекислом газе. – К.: "Техніка", 1960, 1966. – 291 с.
6. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.
7. Потапьевский А.Г., Худяков В.И. Сварка в  $\text{CO}_2$  от источников с комбинированной внешней характеристикой. – Оренбург: МНТЦ, 1990. – С. 26.
8. Оборудование для дуговой сварки. Справочное пособие / Под редакцией В.В. Смирнова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 656 с.
9. Федько В.Т., Киянов С.С., Шматченко В.С., Сапожков С.Б. Применение двухструйных сопловых устройств для сварки в среде защитных газов / Автоматизация и современные технологии. 2003. № 3. С. 12–18.
10. Чинахов Д.А. Влияние двухструйной газовой защиты на эксплуатационные свойства сварных соединений судостроительной стали GL-E36 // Автоматическая сварка. 2009. – № 9. – С. 39–42.
11. Чинахов Д.А. Роль газодинамического воздействия струи защитного газа на процессы сварки плавящимся электродом: монография / Д.А. Чинахов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 151 с.
12. Штрикман М.М., Павлов А.С., Сабанцев А.Н., Егоров В.Н. Дуговая сварка с воздействием на сварочную ванну направленных газоструйных потоков / Сварочное производство. 1999. № 12. С. 3-6.
13. Федоренко Г.А., Иванова И.В., Синяков К.А. Совершенствование технологического процесса сварки в защитных газах на ветру // Сварочное производство. – 2010. – № 1. – С. 6–13.

14. Тарасов М.Н., Тулин В.М. Управление переносом электродного металла кратковременным повышением скорости истечения защитного газа // Сварочное производство. – 1982. – № 8. – С. 23–25.
15. Тарасов Н.М. Отрыв капли электродного металла кратковременным потоком газа // Автоматическая сварка. – 1986. – № 7. – С. 10–13.
16. Островский О.Е., Новиков О.М. Новый метод дуговой сварки с импульсной подачей защитных газов // Сварочное производство. – 1994. – № 11. – С. 10–12.
17. Шейко П.П., Жерносеков А.М., Шевчук С.А. Технологические особенности сварки плавящимся электродом низколегированных сталей с чередующейся подачей защитных газов // Автоматическая сварка. – 1997. – № 8. – С. 32–36.
18. Новиков О.М., Радько Э.П., Иванов Е.Н., Иванов Н.С. Разработка новой технологии дуговой сварки в защитных газах на основе применения пульсаций газовых потоков и потенциалов ионизации // Сварщик-профессионал. – 2006. – № 6. – С. 10–13, 16.
19. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. Издание 2-е переработанное. – К.: «Екотехнологія», 2007. – 192 с.
20. Сагиров Х.Н., Дюргеров Н.Г., Морозкин И.С. Зажигание сварочной дуги. – Ростов-на-Дону: Гефест. 1999. – 200 с.
21. А.с. № 14135 СССР. Выпрямитель для дуговой сварки плавящимся электродом (Патент Украины № 1625611).
22. Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. Сварка порошковой проволокой. – К.: Наукова думка, 1972. – 223с.
23. Столбов В.И. Сварочная ванна: Монография. – Тольятти: ТГУ. – 2007. – 147 с.
24. Петров А.В. Перенос электродного металла в дуге и проплавление основного металла при сварке в защитных газах // Сварочное производство. – 1957. №4 и №8.
25. Пацкевич И.Р. Исследование и применение вибродуговой наплавки. – М.: Машиностроение, 1964.
26. Потапьевский А.Г., Лившиц М.Г., Куплевацкий Л.М. и др. Импульсно-дуговая сварка стали толщиной 0,5–0,8 мм // Сварочное производство. – 1980. – № 4. – С. 15–17.
27. Федько В.Т. Теория, технология и средства снижения набрызгивания при сварке в углекислом газе. – Томск: Изд-во Томского университета, 1998. 192 с.
28. А.с. №22187 Украины. Выпрямитель для дуговой сварки.

29. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – ВО «Наука». – Новосибирск, 1994. – 121 с.
30. Потапьевский А.Г. Виды разбрызгивания металла при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 1974. – № 5. – С. 10–12.
31. Заруба И.И. Механизм разбрызгивания металла при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 1970. – № 11. – С. 12–16.
32. Потапьевский А.Г., Лаврищев В.Я. Разбрызгивание при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. – 1972. – № 8. – С. 39–42.
33. Заруба И.И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла // Автоматическая сварка. – 1970. – № 3. – С. 14 – 18.
34. Попков А.М., Доронин В.П., Кляшицкая В.М. Определение области оптимальных режимов сварки в углекислом газе. – В книге: Вопросы сварочного производства. – Сборник научных трудов ЧПИ. - № 168. – 1975. – С. 132–137.
35. Воропай Н.М. Влияние состояния поверхности электродной проволоки на перенос металла при сварке в защитных газах // Автоматическая сварка. – 1977. – № 3. – С. 68–69.
36. Воропай Н.М., Дегтярев В.Г., Игнатенко П.В. и др. Улучшение сварочно-технологических свойств проволоки Св-08Г2С // Автоматическая сварка. – 1976. – № 8. – С. 61–65.
37. Походня И.К., Орлов Л.Н., Бейниш А.М. Влияние активирования на перенос электродного металла при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. – 1975. – № 1. – С. 4–6.
38. Елистратов А.П., Чернышев Г.Г., Спицин В.В. перенос электродного металла при сварке в смеси защитных газов // Автоматическая сварка. – 1975. – № 12. – С. 61–62.
39. Мартыненко С.А., Свечинский В.Г., Ульянов В.И. и др. Проволока с антикоррозийным покрытием // Автоматическая сварка. – 1976. – № 9. – С. 67–68.
40. Каховский Н.И., Ющенко К.А., Понизовцев В.В. и др. Сварка в защитных газах плавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 1974. – № 12. – С. 19–20.
41. Елистратов А.П., Чернышев Г.Г. Сварка углеродистой стали в газовой смеси аргон – углекислый газ // сварочное производство. – 1973. – № 6. – С. 19–20.
42. Lucas W., Amin M. Effect of wire composition in spray transfer mild steel MIG welding. – Metal Constr. and Brit. Weld. I., 1975, 7. – № 2. – P. 205.
43. Scheibuer Peter MAG-Schweiben mit Mischgasen. – Zis-Mitt. 1977, 19. – № 6. – Pp. 731–740.

44. Спицын В.В. О переносе электродного металла и стабильности дуги в различных пространственных положениях. – В книге: Труды МВТУ, 1969. – № 132. – С. 61 – 65.
45. Заруба И.И., Баграмен В.П., Андреев В.В. и др. Влияние метода ограничения тока короткого замыкания на формирование вертикальных и потолочных швов при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. – 1973. – № 6. – С. 48 – 49.
46. Дюргеров Н.Г. Уменьшение разбрызгивания металла и стабилизация процесса сварки короткой дугой // Автоматическая сварка. – 1972. – № 6. – С. 48–49.
47. Вагнер Ф.А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой. – М.: Энергия, 1980. – 117 с.
48. А.с. 565787 (СССР). Способ регулирования процессом дуговой сварки / Попков А.М. – Оpubл. в Б.И., 1977. – № 27.
49. Попков А.М., Доронин В.П. Экстремальное регулирование при сварке с систематическими короткими замыканиями // Автоматическая сварка. – 1973. – № 1. – С. 51–53.
50. А.с. 565787 (СССР). Способ регулирования процессом дуговой сварки / Попков А.М. – Оpubл. в Б.И., 1977. – № 27.
51. Доронин В.П., Попков А.М., Еланцев А.И. Уменьшение разбрызгивания металла при сварке с короткими замыканиями. – В книге: Вопросы сварочного производства. – Сборник научных трудов ЧПИ. – № 168. – 1975. – С. 138–143.
52. А.с. 214690 (СССР). Способ дуговой сварки / Потапьевский А.Г., Дюргеров Н.Г. – Оpubл. в Б.И. – 1968. – № 12.
53. А.с. 316542 (СССР). Способ дуговой сварки / Потапьевский А.Г., Мечев В.С., Костенюк Н.И. – Оpubл. в Б.И. – 1972. – № 30.
54. А.с. 361026 (СССР). Способ дуговой сварки плавящимся электродом / Потапьевский А.Г., Мечев В.С. – Оpubл. в Б.И. – 1973. – № 1.
55. А.с. 329970 (СССР). Способ дуговой сварки плавящимся электродом / Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Щекин В.А. и др. – Оpubл. в Б.И. – 1970. – № 8.
56. Щекин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. и др. Принудительный перенос металла при сварке модулированным током в углекислом газе // Сварочное производство. – 1973. – № 23. – с. 23.
57. А.с. 162252 (СССР). Способ автоматической (полуавтоматической) импульсно-дуговой сварки / Б.Е. Патон, А.Г. Потапьевский. – Оpubл. в Б.И., – 1970. – № 3.
58. Заруба И.И., Потапьевский А.Г., Лапчинский В.Ф. Влияние динамических свойств источника тока на процесс сварки в углекислом газе

- проволокой диаметром 2 мм // Автоматическая сварка. – 1961. – № 8. – С. 31–40.
- 59.Ищенко Ю.А., Дюргеров Н.Г. О механизме периодических замыканий дугового промежутка и стабильности при сварке короткой дугой // сварочное производство. – 1963. – № 9. – С. 34.
- 60.Чернышев Г.Г., Акулов А.И. Воздействие газодинамического удара на ванну металла при сварке на весу в  $\text{CO}_2$  // Сварочное производство. – 1971. – № 5. – С. 12–14.
- 61.Белоусов В.Н., Остров Д.Д. К вопросу о разбрызгивании металла при сварке в  $\text{CO}_2$  с систематическими короткими замыканиями. – В сб.: Теория и практика сварочного производства. – УПИ. Свердловск. – 1978. – С. 15–18.
- 62.Степанов В.В., Остров Д.Д., Белоусов В.Н. Устойчивость перемычки между плавящимся электродом и ванной при сварке в  $\text{CO}_2$  // Сварочное производство. – 1976. – № 6. – С. 55–56.
- 63.Потапьевский А.Г. Плавление и перенос металла при сварке тонкой электродной проволокой в среде углекислого газа // Автоматическая сварка. – 1958. – № 7. – С. 52–59.
- 64.А.с. 271680 (СССР). Способ электродуговой сварки плавящимся электродом / Заруба И.И. – Оpubл. в Б.И. – 1970. – № 8.
- 65.А.с. 592539 (СССР). Способ электродуговой сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / Зайцев А.и., Князьков А.Ф., Дедюх Р.И. и др. – Оpubл. в Б.И.. – 1978. – № 6.
- 66.А.с. 563241 (СССР). Способ электродуговой сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / Пинчук И.С., Постаушкин В.Ф., Куликов Г.Д. и др. – Оpubл. в Б.И. – 1977. – № 24.
- 67.Степанов В.В., Белоусов В.Н., Остров Д.Д. К вопросу о механизме разрушения перемычки жидкого металла между электродом и сварочной ванной. – В сб.: Сварочное производство, Вып. 1. – Ижевск. – 1977. – С. 3–8.
- 68.Горнов О.М., Чумак Л.Ф. Влияние ступенчатого уменьшения тока в момент короткого замыкания на разбрызгивание при сварке в углекислом газе. – В кн.: Сборник научных трудов ППИ. - № 116. – Пермь. – 1972. – С. 101–103.
- 69.Горнов О.М. Об уменьшении разбрызгивания путем снижения тока короткого замыкания при сварке в углекислом газе. – В сб.: Свариваемость и технология цветных металлов и специальных сплавов. – Пермь. – 1975. – № 164. – С. 115–118.
- 70.Пинчук И.С., Хейфец А.Л., Постаушкин В.Ф. и др. Стабилизация переноса и снижение разбрызгивания электродного металла при сварке

- в  $\text{CO}_2$  короткой дугой // Сварочное производство. – 1980. – № 6. – С. 9–10.
71. Boughton P. Control of short circuiting in MAG-welding. – Weld. Res. Int. – 1974. – № 2. – p. 31–53.
72. Акц. Заявка № 47-48783 (Япония). Способ дуговой сварки с периодическими замыканиями дуги / Осака Хеньяцуки К.К. – Оpubл. в Б.И. за рубежом. – 1973. – № 2-1220.
73. А.с. 503666 (СССР). Устройство для дуговой сварки с короткими замыканиями / Лосев В.Г., Пенкевич Б.Е., Пенкевич В.Е. – Оpubл. в Б.И. – 1976. – № 7.
74. А.с. 209603 (СССР). Стабилизирующий сварочный дроссель / Каспржак Г.М., Стейкунас Р.И., Довидайте Н.Ч. – Оpubл. в Б.И. – 1968. – № 5.
75. А.с. 407675 (СССР). Стабилизирующий сварочный дроссель / Лосев В.Г., Кошкарев Б.Г., Пенкевич В.Е. – Оpubл. в Б.И. – 1974. – № 47.
76. А.с. 490591 (СССР). Стабилизирующий сварочный дроссель / Лосев В.Г., Кошкарев Б.Г., Милованов К.А. – Оpubл. в Б.И. – 1976. – № 41.
77. Лосев В.Г. Стабилизирующий сварочный дроссель. – В кн.: Электродуговая сварка и наплавка. Сборник статей РИСХМ. – Ростов на Дону. – 1975. – С. 34–39.
78. Остров Д.Д., Белоусов В.Н., Норкин В.А. и др. Стабилизирующий сварочный дроссель для сварки в углекислом газе. – В информационном сборнике: Технология организация и механизация сварочного производства. – Москва. – 1979. – № 10. – С. 1–4.
79. Степанов В.В. и др. Расчетное определение формы кривой тока короткого замыкания при сварке в  $\text{CO}_2$  с управляемым дросселем. – В сб.: Теория и практика сварочного производства. – Свердловск. – 1977. – Вып.1. – С. 10–14.
80. Разработка системы автоматической стабилизации процесса сварки в среде  $\text{CO}_2$  с короткими замыканиями / Заключительный отчет № г.р. 75042842. – Тема 4-9/75. – ТПИ / Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н. – Томск. – 1978. – С. 2–14.
81. А.с. 551134 (СССР). Устройство для электродуговой сварки с короткими замыканиями / Горнов О.М., Кузмин Г.С. – Оpubл. в Б.И. – 1977. – № 11.
82. Сараев Ю.Н., Тимошенко А.К. Влияние некоторых типов токоограничивающих устройств на процесс сварки в среде  $\text{CO}_2$  короткой дугой. – В кн.: Прогрессивная технология сварки и резки металлов. – Иркутск. – 1979. – С. 80–93.
83. Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н., Тимошенко А.К. Влияние некоторых типов токоограничивающих устройств на процесс сварки в среде  $\text{CO}_2$

- короткой дугой. – В кн.: Пути повышения эффективности, качества и надежности в сварочном производстве. – Красноярск. – 1979. – С. 34–35.
84. А.с. 554102 (СССР). Стабилизирующий сварочный дроссель/ Зайцев А.И., Князьков А.Ф., Щепкин Е.В., Сараев Ю.Н. и др. – Оpubл. в Б.И. – 1977. – № 14.
85. А.с. 1058169 (СССР). Устройство для дуговой сварки с короткими замыканиями / Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н., Дедюх Р.И. и др. – Приоритет изобретения от 16 августа 1976 г.
86. А.с. 768108 (СССР). Способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка / Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н., Дедюх Р.И. – Приоритет изобретения от 5 июля 1978 г.
87. А.с. 951810 (СССР). Способ дуговой сварки плавящимся электродом / Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н., Тимошенко А.К. – Приоритет изобретения от 28 февраля 1979 г.
88. А.с. 9301975 (СССР). Способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / Князьков А.Ф., Мазель А.Г., Дедюх Р.И., Сараев Ю.Н., Азаров Н.А. – Приоритет изобретения от 16 апреля 1980 г.
89. А.с. 998039 (СССР). Способ для двухэлектродной сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н., Тимошенко А.К., Колесин С.А. – Приоритет изобретения от 16 сентября 1981 г.
90. А.с. 1058171 (СССР). Устройство для дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка / Князьков А.Ф. и Сараев Ю.Н. – Приоритет изобретения от 19 февраля 1980 г.
91. А.с. 1064555 (СССР). Устройство для дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка / Князьков А.Ф. и Сараев Ю.Н. – Приоритет изобретения от 16 апреля 1980 г.
92. А.с. 893441 (СССР). Многопостовое устройство для электродуговой сварки / Князьков А.Ф. и Сараев Ю.Н. – Оpubл. в Б.И. – 1981. – № 48.
93. А.с. 1098146 (СССР). Устройство для дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка / Князьков А.Ф., Сараев Ю.Н., Мазель А.Г. и др. – Приоритет изобретения от 23 апреля 1980 г.
94. Сараев Ю.Н. Разработка и исследование методов и устройств стабилизации процесса автоматической сварки в углекислом газе короткой дугой. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Томск. – 1982. – С. 67–74.
95. Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Генераторы ударной мощности. – М.: Энергия. – 1979. – С. 5–118.

96. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. – М.: Машиностроение. – 1979. – 231 с.
97. Аснис А.Е и др. Сварка в смеси активных газов. – К.: Наукова думка, 1982. – 125 с.
98. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в активных газах. – М.: Машиностроение. – 1972. – 167 с.
99. Чинахов Д.А. Влияние режимов сварки плавлением на структуру и свойства соединений из легированных сталей: монография / Д.А. Чинахов. Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.
100. Гребенчук В.Г., Карасев М.В., Работинский Д.Н., Карасева С.М., Розерт Р. Влияние режимов механизированной сварки металлопорошковой проволокой роVVER BRIDGE 60M на свойства наплавленного металла при сварке мостовых конструкций // Сварка и диагностика. – 2009. – № 1. – С. 19–24.
101. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
102. Сараев Ю.Н. Управление переносом электродного металла при сварке в CO<sub>2</sub> с короткими замыканиями дугового промежутка (обзор) // Автоматическая сварка. – 1998. – № 12. – С. 16–23.
103. N.N. Welding Handbook. – Volume 2. Welding Processes, Eighth, American Welding Society, U.S.A. – 1991.
104. Походня И.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. Сварка порошковой проволокой. – К.: Наукова думка, 1972. – 223с.
105. Разиков М.И. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа. – М.: Машиностроение, 1962. – 212с.
106. Потапьевский А.Г. Сварка в углекислом газе. – М.: Машиностроение, 1984. – 80с.
107. Лоос А.В., Лукутин А.В., Сараев Ю.Н. Источники питания для импульсных электротехнологических процессов. – Томск. Издательско-полиграфическая фирма ТПУ, 1998. – 158 с.: ил.
108. Милютин В.С., Шалимов М.П., Шанчуров С.М. Источники питания для сварки. – М.: Айрис-экспресс, 2007. – 384 с.: ил.
109. Коновалов Ю.Н. Сравнение свойств универсального инверторного источника питания сварочной дуги «МАГМА-315» и традиционных выпрямителей для механизированной сварки / Диагностика и контроль. – 2007. – № 2. – С. 22–23.
110. Порошковая проволока для сварки в судостроении / Л.Н. Орлов, А.А. Голякевич, В.Н. Упырь, С.П. Гиук// Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 52–53.

111. Скороход К.К., Семернев А.М. Микропроцессорные системы управления сварочным оборудованием. – Сварщик. – 2003. – №5. – С. 21–24.
112. Чвертко А.И., Пичак В.Г. Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки. – К.: Наукова думка, 1983. – 56 с. с илл.
113. Примакова Е., Пироженко О. Сертификация продукции, товаров, работ, услуг. 4-е изд. Харьков. Фактор, 2005. – 296 с.
114. Сборник нормативных документов системы аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 102 с.
115. Международные стандарты. Перевод и адаптация. РНТСО. Выпуск 1. ОАО «Калужская типография стандартов», – 2003. – 102 с.
116. СТО РНТСО 003-03. Правила аттестации сварщиков. Сварка плавлением. Стали. – 2003. – 52 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

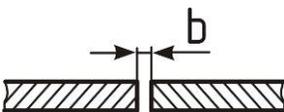
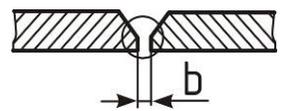
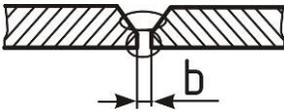
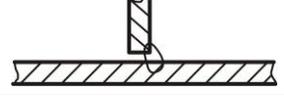
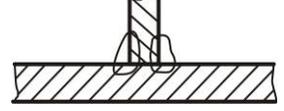
### Приложение 1

*Режимы сварки нахлесточных соединений в CO<sub>2</sub>, и Ar+25% CO<sub>2</sub>  
проволокой Св-08Г2С (обратная полярность)*

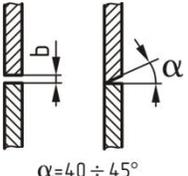
Толщина металла, мм	Положение сварки*	Защитный газ	Зазор, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин	Примечание
0,8+0,8	В	CO <sub>2</sub>	0–0,5	0,8–1	100–120	17,5–19	40–80	8	6–7	На медной подкладке
1+1	Н			0,8–1,2	110–135	18–20	30–50	8–12	7–8	
1+1	В			0,8–1,2	120–150	18–20	40–80	8–12	7–8	На весу или на медной подкладке
1,2+1,2	Н	CO <sub>2</sub> , Ar+25% CO <sub>2</sub>	0–0,5	1–1,2	120–145	18–20	30–50	8–12	6–8	На медной подкладке
	В					130–160		40–80		7–8
2+2	Н и В	CO <sub>2</sub> , Ar + 25% CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , Ar+CO <sub>2</sub>	0–0,5	1–1,4	160–220	19–22	30–70	10–14	8–9	На весу
5+5	Н		0–1	1,2–2	200–500	21–35	30–45	10–20	9–15	
1,5+5	Н и В		0–1	1–1,4	130–180	19–22	30–65	8–14	7–9	

Н – нижнее положение, В – вертикальное сверху вниз.

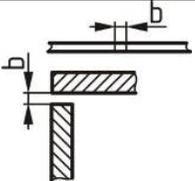
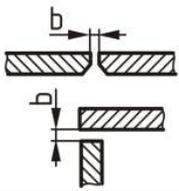
Режимы сварки в  $CO_2$  и в смеси  $.Ar+25\% CO_2$  углеродистые сталей в вертикальном положении проволокой Св-08Г2С (сварка сверху вниз, полярность обратная)

Толщина металла, мм	Эскиз соединения	Зазор, мм	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин
0,8–1 1,2–2 2,2–4		0–1 0–1 0–1,5	I	0,8–1,0 0,8–1,2 1,2–1,4	90–130 140–200 180–260	17–18 18–22 21–24	40–60 40–55 35–55	8–11 8–12 9–12	6–7 6–7 7–8
3–6		1±1	I II	1,2–1,4 1,2–1,4	160–200 200–260	20–23 23–25	25–45 20–40	9–12 9–12	8–9 8–9
8–10		2 <sup>+1</sup> <sub>-2</sub>	I II–III	1,2–1,4 1,2–1,4	160–200 200–260	20–23 23–35	25–45 20–35	9–12 9–12	9–10 9–10
0,8–1 1,5–3		0–0,05	I I	0,8–1 0,8–1,2	90–130 140–200	17–18 18–22	40–55 40–50	8–11 8–12	5–7 6–7
3,2–5,5 6–12		0–1 0–1,5	I–II I–II	1,2–1,4 1,2–1,4	160–240 200–260	20–23 22–26	35–55 25–35	9–12 10–12	7–8 8–10

*Режимы сварки в CO<sub>2</sub> горизонтальных швов проволокой Св-08Г2С (полярность обратная)*

Толщина металла, мм	Эскиз соединения	Зазор, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин
0,8–1	 $\alpha=40 \div 45^\circ$	0–0,5	0,8–1	70–130	17–18,5	25–30	8–10	6–7
1,5		1–1,5	0,8–1,2	100–150	17,5–19,5	19–24	8–12	6–8
3		1,5–2	1–1,4	140–190	20–23	16–18	10–12	7–9
5–6		0–1	1–1,4	150–190	20–23	10–14	12–14	8–10

*Режимы сварки в CO<sub>2</sub> швов в потолочном положении (обратная полярность, проволока Св-08Г2С)*

Толщина металла, мм	Катет шва, мм	Эскиз соединения	Зазор, мм	Диаметр электрода, мм	Число проходов	Сварочный ток, А	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин
1,5–2	1,5–2		0–1	0,8–1,2	1	150–190	18,5–20	23–35	7
3–5	3–5		0–1,5	1–1,2	1	160–260	19–22,5	20–30	8
7–8	6–8		0–1,5	1–1,2	2	160–270	19,5–22,5	17–25	8–9

*Ориентировочные режимы сварки углеродистых сталей в углекислом газе электрозаклепками и точками*

Толщина листов, мм		Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	Длительность сварки, с	Вылет электрода, мм	Расход газа л/мин	Наличие отверстия в верхнем листе
Верхнего	нижнего							
0,5	0,5–2,0	0,8	100–140	18–21	0,6–1,1	6–10	5–6	Нет
0,8	0,8–3,0	0,8	120–160	19–22	0,5–1,2	8–10	5–6	«-«
1,0–1,2	1,0–4,0	0,8–1,0	150–190	20–23	1,0–1,8	8–12	5–7	«-«
1,5	1,5–4,0	1,0–1,2	200–210	21–24	1,4–1,8	10–12	6–7	«-«
1,5	1,5–4,0	1,0–1,2	190–210	21–23	1,3–1,6	10–12	6–7	Есть
2,0	2,0–5,0	1,0–1,4	220–300	22–27	2,0–3,0	10–14	6–8	Нет
2,0	2,0–5,0	1,0–1,4	210–250	22–25	1,6–2,0	10–14	6–7	Есть
3,0	3,0–6,0	1,2–1,6	320–380	30–35	2,0–3,0	12–14	7–8	Нет
3,0	3,0–6,0	1,2–1,6	300–350	28–32	1,9–2,5	12–14	7–8	Есть
4,0	4,0–6,0	1,4–1,6	380–420	33–37	3,0–3,5	13–15	8–9	Нет
4,0	4,0–6,0	1,4–1,6	350–380	32–35	2,2–3,0	13–15	8–9	Есть
5,0	5,0–7,0	1,4–2,0	400–450	34–40	3,5–4,0	14–16	9–10	Нет
6,0	6,0–8,0	1,6–2,5	420–550	38–44	3,0–4,0	14–18	9–10	«-«
8,0	8,0–0,0	2,0–2,5	550–600	43–48	3,0–4,0	16–18	11–12	«-«

Примечание: Постоянный ток, обратная полярность. Режимы сварки точками принимают такими же, как при сварке без отверстия для толщины верхнего листа.

## Химический состав электродных проволок, применяемых при сварке в активных газах, в % (ГОСТ 2246-70)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti
СВ-08ГС	≤0,10	0,60–0,85	1,40–1,70	≤ 0,20	≤ 0,25	–	–
СВ-12ГС	≤0,14	0,60–0,90	1,08–1,10	≤ 0,20	≤ 0,30	–	–
СВ-08Г2С	0,05–0,11	0,70–0,95	1,80–2,10	≤ 0,20	≤ 0,25	–	–
СВ-08ГСМТ	0,06–0,11	0,40–0,70	1,00–1,30	≤ 0,30	≤ 0,30	0,20–0,40	0,05–0,12
СВ-15ГСТЮЦА	0,12–0,18	0,45–0,86	0,60–1,00	≤ 0,30	≤ 0,40	–	0,05–0,20
СВ-20ГСТЮА	0,17–0,23	0,60–0,90	0,90–1,20	≤ 0,30	≤ 0,40	–	0,05–0,20
СВ-18ХГС	0,15–0,22	0,09–1,20	0,80–1,10	0,80–1,10	≤ 0,30	–	–
СВ-10ХМФТ	0,07–0,12	≤ 0,35	0,40–0,70	1,40–1,80	≤ 0,30	–	–
СВ-80ХГ2С	0,05–0,11	0,70–0,95	1,70–2,10	0,70–1,00	≤0,25	0,50–0,60	0,05–0,12
СВ-01Х19Н9	≤ 0,03	0,50–1,00	1,00–2,00	18,0–20,0	8,00–10,00	–	–
СВ-04Х19Н9	≤ 0,06	0,50–1,00	1,00–2,00	18,0–20,0	8,00–10,00	–	–
СВ-07Х18Н9ТЮ	≤ 0,09	≤ 0,80	≤ 2,00	17,0 19,0	8,00–10,00	–	1,00–1,40
СВ-06Х19Н9Т	≤0,08	0,40–1,00	1,00–2,00	18,0–20,	8,00–10,	–	0,50–1,00
СВ-06Х19Н10МЗТ	≤0,06	0,30–0,80	≤2,00	18,0-20,0	9,00–11,00	2,00–3,00	0,50–0,80
СВ-06Х20Н11МЗТБ	≤0,08	0,50–1,00	1,00–2,00	19,0–21,0	10,00–12,00	2,00–3,00	0,60–1,10
СВ-07Х25Н12Г2Т	≤0,09	0,30–1,00	1,50–2,50	24,0–26,5	11,00–13,00	–	0,60–1,00
СВ-07Х25Н12ТЮ	≤0,08	0,60–1,00	≤0,08	24,0–26,5	11,50–13,50	–	0,60–1,00
СВ-08Х25Н13БТЮ	≤0,10	0,60–1,00	≤0,55	24,0–26,5	12,00–14,00	–	0,50–0,90
СВ-08Х20Н9Г7Т	≤0,10	0,50–1,00	5,00–8,00	18,5–22,0	8,00–10,00	–	0,60–0,90

Примечание: серы – не более 0,25%; фосфора – не более 0,25-0,3%

Приложение 3

*Механические свойства металла швов, выполненных сваркой в CO<sub>2</sub> и смеси Ar+CO<sub>2</sub> на обратной полярности, проволока Св-08Г2С диаметром 0,8–1,4мм*

Сталь	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительн ое удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость КСV, Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
					+20	–20	–40
Ст3кп	410–430	510–570	24–29	60–66	120–160	59–65	60–90
Ст3кп	400–420	520–580	25–30	60–66	120–170	60–70	65–80
Ст3сп	370–390***	520–560	22–25	60–66	80–130	55–65	80–120
Ст4кп	420–450	540–580	25–30	60–66	120–170	60–70	70–110
09Г2С	420–450	550–580	27–29	63–66	135–145	60–65	40–60
Ст3кп*	410–430	520–570	22–25	59–60	80–130	55–70	
Ст3кп**	410–420	520–560	26–30	60–66	120–160	80–90	

\* – проволока диаметром 1,6 мм;  
 \*\* – проволока диаметром 1,6 мм после прокатки 200 °С – 2 ч;  
 \*\*\* – проволока Св-08ГС

*Технические характеристики некоторых полуавтоматов*

Тип	Диаметр про- волоки, мм	Сварочный ток, А (при ПВ 60%)	Скорости по- дачи, м/ч	Масса механиче- ская подачи/ вы- прямителя, кг	Выпрямит. Из- менение напря- жения	Изготовитель
1	2	3	4	5	6	7
ПДГ-152	0,6–1,0	100 ПВ35%	100–600 плавное	1-блочный 35 кг	комплексное плавное	СЭЛМА
ПДГ-252	0,8–1,4	250 ПВ40%	160–960 плавное	1-блочный 60кг	комплексное плавное	СЭЛМА
A547Ум	0,8–1,4 и 1,0–1,6 порошковая	60–375 ПВ 60%)	115–960 32 ступени	2-х блочный 7,4/200	п/а ВС-300Б 32 ступени	Артем- Контакт ЭЛКОН
A547Ум-4	0,8–1,6	50–315 ПВ80%	30–700 плавное	2-х блочный 10/48	ВДУЧ-350*	Коммунар АМИТИ
ПДГ-402*	0,8–1,6	60–400 ПВ100%	50–1000 плавное	10/230	ВДГ25-401 плавное	
ПДГ-312-5	0,8–1,4	80–315	100м960	12/200	ВДГ-303-3	СЭЛМА
ПДГИ-401	0,8–1,6	ПВ35% 80–400	100м960 плавное	14,5/250	ВДГИ-401***	
КП016	0,8–1,6 ПП 1,2–1,6	90–315 ПВ60%	120–1200 плавное	2-х блочный 27/205	КИУ-301 плавное	КЗЭСО
ПДГ-508М	1,2–2,0 ПП 1,2–2,0	120–500 60–500 ПВ60%	120–1200 27ступен.	2-х блочный 24/275	КИУ-501 плавное	КЗЭСО

1	2	3	4	5	6	7
ПДГО-510С	1,2–2,0 ПП 1,6–3,2	100–630 ПВ40%	100–960 плавное	2-х блочный 15/300	ВДУ601 плавное	СЭЛМА
ПДГ-630*  ПДГ-603	1,2–2,0 ПП 1,2–3,2	60–630 250–700 60–500 ПВ:60%	50–600 250–1200 98–1200 плавное	2-х блочный 10/270 18/275	ВДГ25-630  КИУ501	АМИТИ – КЗЭСО
ПДГИ-304 ПДГИ-401	0,8–1,4 1,2–2,0	50–315 50–400 ПВ40%	100–960 плавное	12/240 12/205	ВДГИ-302 ВДГИ-401	СЭЛМА
Варио Стар 357 357-2 457 457-2	0,8–1,6  0,8–1,6 0,8–1,6	40–350 ПВ40% 40–450 ПВ40%	30–1320 плавное 30–1320 плавное	1 блочный 2 блочный 1 блочный 2-х блочный	143 13/140 168 13/155	«Фрониус Украина»
*) двухрежимные, **) для роботов, ***) для импульсной сварки						

*Перечень стандартов,  
действующих в области сварки в защитных газах*

1. ГОСТ 2.601-2006 Эксплуатационная документация.
2. ГОСТ 12.2.007.0-75 ССБТ Изделия электротехнические. Требования безопасности.
3. ГОСТ 12.2.007.8-75 ССБТ Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности.
4. ГОСТ 12.2.008-75 Оборудования и аппаратура для газопламенной обработки металлов и термического напыления покрытий. Требования безопасности.
5. ГОСТ 12.3.003-86, ССБТ. Работы электросварочные. Требования безопасности.
6. ГОСТ 12.4.035-78 Щитки защитные лицевые для электросварщиков. Технические условия.
7. ГОСТ 2246-70 Проволока стальная сварочная. Технические условия.
8. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий.
9. ГОСТ 4997-75 Ковры диэлектрические резиновые. Технические условия.
10. ГОСТ 5583-78 Состав газообразного технического кислорода. Технические условия.
11. ГОСТ 7871-75 Проволока сварочная из сплавов алюминия. Технические условия.
12. ГОСТ 8050-85 Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия.
13. ГОСТ 8213-75 Автоматы для дуговой сварки плавящимся электродом. Общие технические условия.
14. ГОСТ 13385-78 Обувь специальная диэлектрическая, из полимерных материалов. Технические условия.
15. ГОСТ 13821-77Е Выпрямители однопостовые с падающими внешними характеристиками для дуговой сварки. Общие технические условия.
16. ГОСТ 14254-96 Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP).
17. ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные, основные типы, конструктивные размеры

18 ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

19. ГОСТ 16130-90 Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе. Технические условия.

20. ГОСТ 16842-82 Радиопомехи промышленные. Допустимые значения методы испытаний. Нормы 8-95 и 8-72.

21. ГОСТ 18130-79 Полуавтоматы для дуговой сварки плавящимся электродом. Общие технические условия.

22. ГОСТ 20461-75 . Гелий газообразный. Метод определения доли примесей эмиссионным спектральным анализом.

23. ГОСТ 25616-83 Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств.

24. ГОСТ 27265-87 Проволока сварочная из титановых сплавов. Технические условия.

25. ИЕС ЕИ 60974-1:2002, Оборудование для дуговой сварки. Часть 1. Источники тока.

26 ИЕС 60974-7:2003, Оборудование для дуговой сварки. Часть 7. Горелки.

27. ИЕС 60974-12:2003, Оборудование для дуговой сварки. Часть 12. Устройства соединительные для кабелей.

28. ДСТУ 2456-94 Сварка дуговая и электрошлаковая. Требования безопасности.

29. ПУЭ-85, Правила устройства электроустановок, Утверждены Минэнерго СССР, 06.07.84.

Научное издание

ПОТАПЬЕВСКИЙ Аркадий Григорьевич  
САРАЕВ Юрий Николаевич  
ЧИНАХОВ Дмитрий Анатольевич

**СВАРКА СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ  
ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ.  
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО**

Монография

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка *Д.А. Чинахов, Э.Ф. Кусова*  
Дизайн обложки *Е.Г. Фисоченко*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 28.11.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 12,1. Уч.-изд. л. 10,94.  
Заказ 1372-12. Тираж 600 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru