

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»
Учреждение Российской академии образования «Уральское отделение»
Академия профессионального образования

М. А. Федулова

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ**

Учебное пособие

*Допущено Учебно-методическим объединением
по профессионально-педагогическому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведе-
ний, обучающихся по специальности 050501.08 – Профессиональное
обучение (машиностроение и технологическое оборудование)*

Екатеринбург
2009

УДК 621.791(075.8)

ББК К641.51-1я73-1

Ф32

Федулова М. А. Физико-химические процессы в сварочной дуге
[Текст]: учеб. пособие / М. А. Федулова. Екатеринбург: Изд-во ГОУ
ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2009. 79 с.

ISBN 978-5-8050-0306-7

Обобщен и систематизирован материал, раскрывающий теоретические основы процессов, происходящих в дуговом разряде. Рассмотрены условия и факторы, обеспечивающие стабильность дугового разряда, особенности и разновидности дуговых разрядов.

Пособие предназначено для студентов – будущих педагогов профессионального обучения специализации «Технологии и технологический менеджмент в сварочном производстве».

Рецензенты: доц., канд. техн. наук С. А. Тютюков (ГОУ ВПО «Уральская государственная сельскохозяйственная академия»); канд. техн. наук, доц. Н. И. Ульяшин (ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

ISBN 978-5-8050-0306-7

© ГОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический
университет», 2009

© Федулова М. А., 2009

Оглавление

Введение.....	5
1. Общая характеристика дуги, ее строение.....	7
Вопросы для самоконтроля	10
2. Элементарные процессы, происходящие в электрической дуге.....	11
2.1. Процессы на катоде и в катодной области	11
2.1.1. Механизмы эмиссии электронов с поверхности металлов	12
2.1.2. Процессы в катодном пятне	15
2.2. Процессы в столбе дуги	16
2.2.1. Ионизация.....	16
2.2.2. Механизмы ионизации.....	18
2.3. Процессы на аноде и в анодной области	24
Вопросы для самоконтроля	25
3. Неоднородность свойств электрической дуги	26
3.1. Вольт-амперная характеристика сварочной дуги	26
3.2. Распределение электрического поля дуги	28
3.2.1. Схема энергетического баланса на катоде.....	28
3.2.2. Схема энергетического баланса в столбе дуги.....	31
3.2.3. Схема энергетического баланса на аноде	32
Вопросы для самоконтроля	35
4. Влияние магнитных полей на сварочную дугу	36
4.1. Влияние собственного магнитного поля дуги.....	36
4.2. Воздействие посторонних магнитных полей на сварочную дугу.....	37
4.3. Влияние ферромагнитных масс	40
Вопросы для самоконтроля	40
5. Условия устойчивого горения дуги.....	41
Вопросы для самоконтроля	42

6. Сварочная дуга плавящимся электродом. Перенос металла через дугу	43
Вопросы для самоконтроля	50
7. Особенности дуги обратной полярности.....	51
Вопросы для самоконтроля	52
8. Особенности дуги переменного тока	53
Вопросы для самоконтроля	55
9. Особенности сварочной дуги в защитных газах.....	56
9.1. Сварочная дуга в среде углекислого газа	57
9.2. Сварочная дуга в среде инертных газов.....	60
Вопросы для самоконтроля	63
10. Сварочная дуга под флюсом	64
Вопросы для самоконтроля	65
11. Плазменная сварочная дуга (сжатая дуга).....	66
Вопросы для самоконтроля	69
Заключение.....	70
Библиографический список.....	71
Приложение 1. Кроссворд по теме «Физико-химические процессы в сварочной дуге»	73
Приложение 2. Контрольные тесты по теме «Сварочная дуга»	75
Приложение 3. Тематика индивидуальных заданий для самостоятельной работы студентов.....	78

Введение

Изучение дисциплины «Теория сварочных процессов» является начальным этапом специальной подготовки педагогов профессионального обучения специализации «Технологии и технологический менеджмент в сварочном производстве». Она изучается на стыке дисциплин естественнонаучного цикла (физика, химия) и дисциплин специализации, т. е. по содержанию представляет собой сферу знаний, где физические явления и химические процессы рассматриваются в контексте применения в области сварочного производства.

Важное место при освоении данной дисциплины отводится изучению физико-химических процессов в источниках энергии для сварки, где особое внимание уделяется сварочной дуге как наиболее распространенному источнику энергии для сварки. Система знаний о сварочной дуге поможет сформировать у педагога профессионального обучения такие умения, как способность к выбору оптимального способа сварки и источников энергии для сварки; способность анализировать возможность протекания физических и химико-металлургических процессов при различных видах электродуговой сварки.

Электрическая дуговая сварка является ведущим технологическим процессом в производстве сварных конструкций. Источником нагрева при дуговой сварке служит электрическая дуга, определяющая производительность сварочных процессов. Тепловые, химико-металлургические, термомодеформационные процессы, происходящие при создании сварного соединения, непосредственно связаны с процессами в сварочной дуге. Изучение природы и закономерностей этих процессов и явлений создает предпосылки для их обоснованного использования, расширения возможностей рационального управления ими, совершенствования их применения.

Исследованиям сварочной дуги посвящено большое количество работ, изданных как в Российской Федерации, так и за рубежом. Однако монографии, в которых опубликованы исследования сварочной дуги, представлены физико-химические процессы, происходящие в дуге, рассмотрены технологические свойства различных дуг, датированы 70–80-ми гг. XX столетия. Они предназначены для научных работников и инженеров, а также студентов инженерных вузов, спе-

циализирующихся в области сварочного производства, что отражается в их содержании, направленности представленной информации на подготовку специалистов к технической деятельности.

Специфика подготовки педагогов профессионального обучения специализации «Технологии и технологический менеджмент в сварочном производстве» обусловлена целью обучения, которая заключается в подготовке специалистов для осуществления обучения рабочих по профессии «сварщик». Поэтому специальная подготовка педагога профессионального обучения при производственно-технологическом содержании должна иметь педагогическую направленность. Это необходимо учитывать при проектировании процесса обучения специальным дисциплинам, когда содержание учебной информации предполагает знания из инженерной области, а деятельностный аспект усвоения информации должен быть интегрирован с будущей профессионально-педагогической деятельностью.

Учебное пособие содержит теоретические сведения о процессах, происходящих в сварочных дугах, их закономерностях, особенностях протекания в различных условиях. Структура и последовательность изложения информации соответствуют рабочей программе дисциплины «Теория сварочных процессов». В конце каждого раздела даны вопросы для самоконтроля. Итоговым этапом проверки усвоения изученного материала может быть решение кроссворда и выполнение тестов (прил. 1 и 2). В прил. 3 представлена тематика индивидуальных заданий для самостоятельной работы студентов.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДУГИ, ЕЕ СТРОЕНИЕ

Электрический ток при некоторых условиях может проходить не только через металлические твердые проводники, но и через газы. Явление протекания электрического тока через газы называется *электрическим газовым разрядом*.

Существует несколько видов газового разряда. Все они могут быть разделены на две основные группы: несамостоятельные и самостоятельные газовые разряды. Для существования несамостоятельных газовых разрядов необходимы внешние «ионизаторы», непрерывно создающие электрические заряженные частицы: электроны, положительно и отрицательно заряженные ионы.

Для возникновения самостоятельных газовых разрядов внешние «ионизаторы» не нужны, так как заряженные частицы в необходимом количестве образуются в результате явлений, протекающих в самом разряде. Одним из важнейших видов самостоятельного газового разряда является электрическая дуга, которая была открыта в 1802 г. профессором физики Петербургской медико-хирургической академии Василием Владимировичем Петровым.

Сварочной дугой называется мощный, длительно существующий между находящимися под напряжением электродами электрический разряд в смеси газов и паров. Сварочная дуга характеризуется высокой температурой газов и большой плотностью тока в зоне разряда.

Возникновение дуги осуществляется двумя способами:

1) *коротким замыканием* электродов либо электрода на свариваемое изделие, а затем их разведением. После короткого замыкания двух твердых тел проходящий через имеющиеся на поверхности электродов микровыступы электрический ток вызывает быстрый нагрев и испарение контактных мостиков, в результате чего металл разогревается до температуры кипения и после нарушения металлического контакта в межэлектродном промежутке появляются электрически заряженные частицы;

2) *путем электрического пробоя воздушного промежутка* с помощью высокочастотного электрического разряда. Для этого в сварочную цепь параллельно основному источнику питания подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (ос-

циллятор). Осциллятор обеспечивает бесконтактное зажигание. Его используют при сварке дугой малой мощности, аргонодуговой сварке на малых токах, при сварке в защитных газах тонколистового металла, при пониженном напряжении холостого хода источника тока.

Электрическая дуга представляет собой определенный объем цилиндрической или конической формы. Она материальна и состоит из конкретных носителей энергии, которую они передают в зону сварки посредством лучистой энергии (излучение) и конвективной теплоотдачи. Носителями энергии в дуге являются ионы (положительные и отрицательные частицы), электроны (масса электрона $9,03 \cdot 10^{-28}$ г, заряд $-1,59 \cdot 10^{-19}$ Кл), молекулы и атомы газов.

В зависимости от материала и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в электрическую цепь различают следующие схемы дуговой сварки:

- Сварка плавящимся (металлическим) электродом дугой прямого действия, когда происходит одновременное расплавление основного металла и электрода. Существенным признаком характера дуги является происхождение газа в столбе дуги, который в значительной мере образуется из материалов электродов. Такую дугу называют *дугой в парах* (рис. 1, а).

- Сварка неплавящимся (вольфрамовым или угольным) электродом, когда соединение выполняется путем расплавления основного металла либо с применением присадочного. Если дуга горит в постороннем газе (например, дуга между вольфрамовыми электродами в водороде при атомно-водородной сварке или дуга в аргоне), то ее называют *дугой в газе* (рис. 1, б).

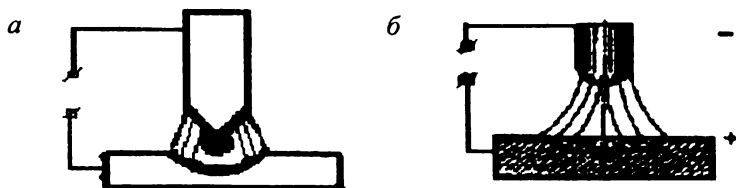


Рис. 1. Схема дуги:

а – с плавящимся электродом (дуга в парах);
б – с неплавящимся электродом (дуга в газе)

- Сварка косвенной дугой, горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами, когда основной металл нагревается и расплавляется теплотой столба дуги (рис. 2).

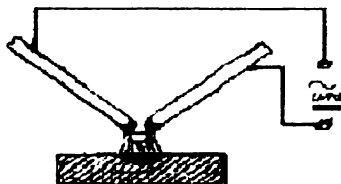


Рис. 2. Схема дуги косвенного действия

- Сварка трехфазной дугой, при которой дуга горит между электродами, а также между каждым электродом и основным металлом (рис. 3).

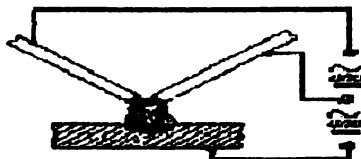


Рис. 3. Схема трехфазной дуги

При применении постоянного тока (источником питания для сварки являются сварочные генераторы и выпрямители) различают сварку на прямой и обратной полярности. В первом случае электрод подключается к отрицательному полюсу и называется катодом, во втором случае – к положительному и служит анодом.

При сварке на переменном токе каждый из электродов является попеременно то анодом, то катодом.

Промежуток между электродами называют *областью дугового разряда* или *дуговым промежутком*. Длину дугового промежутка называют *длиной дуги*. Если длина дуги составляет 2–3 мм, то это короткая дуга; если 3–5 мм – средняя; если 5 мм и более – длинная дуга. От длины дуги зависит устойчивость ее горения.

Дуговой промежуток обычно разделяют на три характерные области (рис. 4):

- *катодную область* 3, примыкающую к катоду 2;

- *анодную область 5*, примыкающую к аноду *1*;
- промежуток между катодной и анодной областями – *столб дуги 4*.

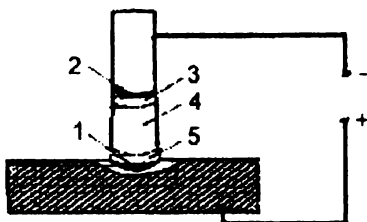


Рис. 4. Схема строения сварочной дуги

Катодная и анодная области имеют незначительную протяженность ($\approx 10^{-3}$ – 10^{-5} см), но процессы, происходящие в данных областях, очень важны для формирования свойств электрической дуги. На поверхности анода и катода образуются активные, наиболее нагретые пятна (соответственно *анодное* и *катодное* пятна), через которые проходит ток дуги.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое явление называют электрической дугой?
2. Почему электрическую дугу используют в сварочных процессах?
3. Какие процессы сопровождают возникновение дуги?
4. Как организована трехфазная дуга?
5. Каково строение дуги? Как расположены области дуги, какова их протяженность?

2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ

В обычных условиях при низких температурах газы состоят из нейтральных атомов и молекул, не содержащих заряженных частиц, не обладающих электропроводимостью, т. е. являющихся изоляторами. Прохождение электрического тока через газ возможно только при наличии в нем заряженных частиц. Это могут быть электроны (элементарные отрицательные частицы) и ионы (отрицательные и положительные частицы). Возникновение заряженных частиц в дуговом промежутке обусловлено эмиссией электронов с поверхности электрода (катода) и ионизацией молекул газов, находящихся в дуговом промежутке.

2.1. Процессы на катоде и в катодной области

В дуговом разряде очень большое значение имеет процесс эмиссии электронов с поверхности металлических электродов. Электроны проводимости при некоторых условиях могут покинуть металлы и перейти в газовую среду. Для этого они должны преодолеть равнодействующую всех сил притяжения со стороны положительных ионов металла, направленную внутрь металла.

Эмиссия электронов – процесс испускания (выхода) электронов с поверхности конденсированных веществ (твердых или жидких) в окружающую среду. Вещества в конденсированном состоянии обладают способностью в зависимости от условий отдавать электроны в окружающую среду, при этом поверхность вещества приобретает положительный заряд, а часть пространства над ним – отрицательный, т. е. возникает двойной электрический слой. Количество энергии, необходимое для выхода электрона с поверхности конденсированного вещества и удаления его из сферы действия электрического поля иона, называют *работой выхода электрона* ϕ_0 .

Значения работы выхода электрона (ϕ_0) для некоторых металлов указаны ниже:

Химический элемент	Na	Al	Ca	Ti	Fe	Mn
ϕ_0 , эВ	2,33	4,25	2,96	3,92	4,18	3,76

Величина φ_3 зависит от природы вещества, чистоты поверхности и температуры материала.

2.1.1. Механизмы эмиссии электронов с поверхности металлов

Существует большое количество гипотез и теорий, посвященных механизму эмиссии с поверхности катода, которые сводятся к объяснению четырех основных механизмов осуществления эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия обуславливается способностью нагретой поверхности металла испускать электроны. Такой процесс имеет место, если скорость теплового движения электрона проводимости, нормальная к поверхности излучения, достигнет значения, при котором будет выполняться условие

$$\frac{3}{2}kT \geq e\varphi_3,$$

где e – заряд электрона, Кл;

φ_3 – энергия выхода электрона, эВ;

T – температура;

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

При возрастании температуры повышается доля электронов, обладающих этой энергией, что приводит к увеличению эмиссионного потока. Плотность потока термоэлектронной эмиссии может быть вычислена по формуле Ричардсона – Дэшмана, выведенной на основе теоретических рассуждений, подкрепленных обширными экспериментальными исследованиями [4].

$$j = AT^2 e^{-\frac{\varphi_3}{kT}}, \quad (1)$$

где j – плотность тока эмиссии, А/см²;

A – коэффициент, для всех металлов равный 120,4 А/см²;

T – температура, К;

φ_3 – энергия выхода электрона.

Результаты расчетов по уравнению (1) показывают, что интенсивность эмиссии, достаточная для обеспечения плотности тока порядка 1000 А/см², возможна при температурах катодов $T = 3500$ – 4500 К. При снижении температуры плотность тока эмиссии резко падает и уже при

температуре 3000 К не превышает 50 А/см^2 при работе выхода электрона $\phi_0 = 4,18 \text{ эВ}$ (железо). Следовательно, термоэлектронный механизм тока через границу катод – газ можно допустить у катодов, изготовленных из металлов с высокой температурой кипения (выше 3500 К). К ним относятся вольфрам, осмий, молибден, платина и графит. Следует отметить, что такой механизм эмиссии непригоден для описания процессов, происходящих у границ всех остальных металлов, температура которых, требуемая для эмиссии, не может быть достигнута из-за их испарения (так, температура кипения железа 3271 К, меди – 3133 К).

В связи с этим по отношению к возможности создания термоэлектронной эмиссией необходимой плотности тока катоды делятся на горячие (эмиссия может быть достаточна) и холодные (эмиссия очень мала). Теория термоэлектронной эмиссии описывает процессы, происходящие на поверхности горячих катодов. Однако истинная величина термоэлектронной эмиссии в условиях сварочной дуги рассчитывалась по уравнению (1), а экспериментально не была измерена.

Для поддержания постоянной эмиссии у металла должно быть сильное электрическое поле, способное удалять электроны. В противном случае электроны, скапливаясь у излучающей поверхности, создают поле отрицательного знака, которое задерживает эмиссию электронов.

При *автоэлектронной эмиссии* энергия, необходимая для удаления электронов с поверхности катода, сообщается приложенным внешним электрическим полем. Плотность тока автоэлектронной эмиссии зависит от напряженности приложенного электрического поля и может быть определена по формуле Фаулера – Нордгейма:

$$j = \gamma E^2 e^{-\frac{b\phi_0^2}{E}},$$

где j – плотность тока эмиссии, А/мм^2 ;

γ, b – константы, зависящие от материала катода;

E – напряженность приложенного электрического поля, В/мм .

Автоэлектронная эмиссия возможна и при низких температурах, она возникает, когда у поверхности создается электрическое поле высокой напряженности (104–105 В/мм), ее иногда называют эмиссией холодного катода. Вклад этого типа эмиссии наиболее существенен.

При ударной эмиссии (соударением) переход электрона из вещества осуществляется за счет энергии удара частицы (тяжелого катиона) о поверхность катода. При столкновении с катодом эмиссию будут вызывать главным образом положительные ионы из столба дуги, так как отрицательно заряженные ионы вблизи поверхности катода будут испытывать торможение.

Ударяясь о поверхность катода, положительно заряженные ионы будут кроме кинетической энергии возвращать работу ионизации, получая обратно электрон. Атом, образовавшийся из положительно заряженного иона, может или отскочить от поверхности катода, или уйти в нее, растворяясь в металле. Энергия, отданная положительным ионом, может вызвать выход электрона из металла.

Условие выхода электрона при ударе положительно заряженного иона о поверхность катода описывается следующим уравнением:

$$\left(eU_{\text{ион}} + \frac{m_i v_i^2}{2} \right) \cdot \left(\varphi_3 + \frac{m_e v_e^2}{2} \right) \geq 0,$$

где $eU_{\text{ион}}$ – работа ионизации положительного иона;

$\frac{m_i v_i^2}{2}$ – кинетическая энергия положительного иона;

$\frac{m_e v_e^2}{2}$ – кинетическая энергия эмитированного электрона;

φ_3 – энергия выхода электрона.

Эмиссия электронов под действием ударов тяжелых частиц имеет существенное значение в дуговых разрядах сварочного режима, ее реализация характеризуется высокой степенью ионизации и большой концентрацией газа в дуговом промежутке.

Положительные ионы приносят к катоду значительное количество энергии, что существенно влияет на тепловой баланс катода, при этом они могут вступать в химическое взаимодействие с материалом катода, образуя нейтральные молекулы, а также освобождать некоторое количество электронов с поверхности катода. Наиболее важным результатом воздействия положительных ионов, бомбардирующих катод, является нагревание катода.

Фотозлектронная эмиссия происходит вследствие передачи квантами излучения электронам проводимости энергии, которой до-

статочно для выхода электронов за пределы электрода. Условие осуществления фотоэлектронной эмиссии может определяться следующим соотношением:

$$h\nu \geq e\varphi_0,$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота колебаний электромагнитных излучений в секунду;

e – заряд электрона, К.

Установлено, что, чем короче длина волны, тем большее количество электронов выделяется с поверхности катода. Мощные потоки световых лучей, сопутствующие горению сварочной дуги, вызывают некоторый выход электронов как с поверхности электрода, так и из материалов, входящих в состав покрытия.

Фотоэлектронная эмиссия в дуговом разряде имеет вторичное значение, она невелика, так как обычные промышленные металлы имеют значительную работу выхода и эмиссия может быть вызвана только поглощением короткого ультрафиолетового излучения.

Работа выхода электрона весьма чувствительна к составу эмитирующего вещества, загрязнениям и пленкам на поверхности. Часто из-за этого она заметно изменяется. Эмиссионная способность катода может быть многократно усилена нанесением на него пленок и слоев оксидов с низкой работой выхода. Нанесение оксидов кальция, стронция, бария может понизить работу выхода на катоде до 1 В вместо 4,4–5 В для металлов с идеально чистой поверхностью. В сварочной технике эту возможность используют для усиления эмиссии с катода за счет нанесения веществ, усиливающих ее.

2.1.2. Процессы в катодном пятне

Катодное пятно является важнейшей частью дуги, так как из него происходит эмиссия электронов. Всякие перемещения катодного пятна легко вызывают обрыв дуги. Анодное пятно, в отличие от катодного, может перемещаться по поверхности электродов с большой скоростью, не мешая процессу горения дуги.

Размеры катодного пятна зависят от силы тока, материала электродов, давления и состава газовой среды, а также от ряда других факторов. Определение размеров катодного пятна и плотности в нем тока представляет для исследователей серьезные затруднения, особенно

в тех случаях, когда электроды расплавляются. Температура металла в катодном пятне очень высока и приближается к температуре кипения металла. Экспериментальное определение температуры в катодном пятне представляет собой сложную задачу, вследствие этого имеющиеся в литературе данные являются только приближенными [1].

Некоторые значения температуры катодного пятна и температуры кипения металлов приведены в таблице [1, с. 78].

Значения температуры катодного пятна
и температуры кипения металлов

Показатель	Металлы				
	Ni	Fe	Mg	Al	W
Температура катодного пятна, К	2365	2430	3000	3400	3640
Температура кипения металла катода, К	3173	3271	1380	2330	6200

Высокие температуры катодного пятна на электродах из магния и алюминия можно объяснить образованием оксидных пленок. Оксиды магния и алюминия плавятся при значительно более высоких температурах, чем сами металлы.

Весьма существенными для металлической дуги процессами, происходящими на катоде, являются плавление и испарение материала катода. Процесс плавления определяет производительность сварки и является основным потребителем мощности, расходуемой на катоде, процесс испарения обогащает парами материала катода столб дуги. Пары материала катода в значительной мере определяют состав газов в столбе дуги.

2.2. Процессы в столбе дуги

2.2.1. Ионизация

Основная часть дугового промежутка – столб дуги, она примыкает к электродам, через которые питается током от источников. Материал электродов – твердый и жидкий проводник, чаще всего металл, – соприкасается с газовым проводником – столбом дуги. На очень малом промежутке чрезвычайно резко меняются составы веществ и виды заряженных частиц – носителей тока, что обуславливает очень сложный характер процессов протекания тока в пограничных областях, где наблюдаются необычайно высокие значения напряженности электрического поля, высокие температуры и малая протяженность исследуемых областей.

Газовая атмосфера дугового промежутка многокомпонентна, она содержит пары электродного материала, который может представлять собой сложные сплавы, пары неметаллической части электродных покрытий или флюсов и компонентов газовой среды, в которой возбуждена дуга.

В дуговом промежутке кроме таких заряженных частиц, как электроны, находятся и другие заряженные частицы – ионы. Явление возникновения из нейтральных атомов и молекул газа заряженных частиц (положительных или отрицательных ионов) называется *ионизацией*. При отнятии электрона требуется затрата энергии для преодоления внутренних сил притяжения в атоме или молекуле.

Минимальное значение энергии, необходимой для того, чтобы произошел процесс ионизации, называют *энергией ионизации* или *потенциалом ионизации* ($U_{\text{ион}}$). Величины энергии ионизации некоторых элементов указаны ниже:

Химический элемент	K	Na	Al	Ca	Ti	Mn	Fe	Ar	He
$U_{\text{ион}}, \text{эВ}$	4,32	5,12	5,96	6,08	6,81	7,6	7,83	15,7	24,5

Вырывание электрона (ионизация) и образование положительного иона легче происходит из атомов элементов, расположенных в 1-й и 2-й группах Периодической системы элементов Менделеева, например: $\text{Na} - e \rightarrow \text{Na}^+$.

Атомы и молекулы имеют несколько потенциалов ионизации, так как они могут по очереди отдавать и принимать электроны. Наиболее легко участвуют в процессе ионизации валентные электроны. Легче других ионизируются атомы щелочных и щелочноземельных элементов, наличие которых благоприятно сказывается на устойчивости горения дуги. Чем больше размер атома, тем легче он отдает электроны.

Соединение электрона с нейтральной частицей сопровождается выделением энергии. Вероятность образования отрицательных ионов больше у элементов, внешние электронные оболочки атомов которых ближе всего к заполнению (F, Cl, Br, O), например: $\text{Cl} + e \rightarrow \text{Cl}^-$.

Кроме ионизации возможно возбуждение нейтральных газовых частиц. При возбуждении происходит переход электронов на орбиты с более высоким энергетическим уровнем. Возбуждение частиц сопровождается затратой энергии. Возбужденная частица неустойчива и легко возвращается в исходное нейтральное состояние, выделяя энергию электромагнитного излучения.

Заряженные частицы противоположного знака при некоторых условиях могут воссоединиться, образуя нейтральную частицу и выделяя энергию электромагнитного излучения. Этот процесс называется *рекомбинацией*.

Появление заряженных частиц в газовой среде дугового промежутка обусловлено различными факторами.

Поступающие в газовую среду электроны, ускоряемые электрическим полем, участвуют в столкновениях с нейтральными молекулами и атомами, передавая свою энергию, накопленную в электрическом поле, другим частицам.

Все столкновения, существующие в газовом объеме дуги, можно разбить на две группы: 1) упругие столкновения (неактивные); 2) неупругие столкновения (активные).

Упругие столкновения не приводят к перестройке частиц, а лишь изменяют их скорости в соответствии с законами столкновения идеально упругих тел. В этом случае электрон не подходит на близкое расстояние к нейтральной частице, так как испытывает торможение от электронных слоев, ограничивающих любую частицу в газе (молекула, атом, ион). Упругие столкновения электрона с нейтральными частицами трансформируют электрическую энергию в тепловую, вызывая увеличение теплосодержания газа и рост его температуры, что объясняет высокую температуру газов в дуговом промежутке.

Неупругие, или неактивные, столкновения приводят к перестройке частиц, сталкивающихся с электроном. В этом случае энергия, накопленная электроном в электрическом поле, расходуется на деформацию либо перестройку молекул или атомов. Электрон после такого столкновения вновь набирает энергию в промежутке до следующего столкновения.

2.2.2. Механизмы ионизации

Ударная ионизация, или ионизация соударением. В результате неупругого соударения атомов и молекул газов с электронами (e_0^\bullet), эмитируемыми с поверхности катода, происходят процессы ионизации и диссоциации газовых молекул:

1) ионизация атомов и молекул: $Fe^0 + e_0^\bullet = Fe^+ + 2e_0$, где Fe^0 – молекула газообразного железа; e_0^\bullet – электрон, эмитируемый с катода;

Fe^+ – ион железа; e_0 – электрон с энергией, соответствующей тепловому движению;

2) диссоциация молекул: $\text{H}_2 + e_0^* = 2\text{H} + e_0$, где H_2 – молекула водорода; e_0^* – электрон, эмитируемый с катода; H – атом водорода; e_0 – электрон с энергией, соответствующей тепловому движению.

Фотоионизация происходит при поглощении частицей кванта электромагнитного излучения. Источником излучения может быть сама дуга. Для процесса фотоионизации необходимо выполнение условия, определяемого следующим соотношением:

$$h\nu \geq eU_{\text{ион}},$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота колебаний электромагнитных излучений, с;

e – заряд электрона;

$U_{\text{ион}}$ – энергия ионизации.

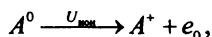
Расчеты показывают, что видимый свет не может ионизировать газы, ультрафиолетовое излучение ионизирует газы с малым потенциалом ионизации. Кванты рентгеновского и γ -излучения с очень малой длиной волны обладают огромным запасом энергии и являются ионизаторами для всех газов.

Термическая ионизация протекает при высоких температурах за счет неупругих столкновений нейтральных частиц газа, имеющих большую кинетическую энергию. Появившиеся в газовой среде свободные электроны также участвуют в процессах ионизации и возбуждения нейтральных частиц. С повышением температуры роль электронов в ионизации возрастает. Одновременно с процессами ионизации газа протекают и процессы рекомбинации ионов и электронов в нейтральные частицы. Интенсивность обоих процессов зависит от температуры газа.

В обычном дуговом разряде термическая ионизация занимает основное место. В результате плазма состоит из трех различных компонентов: нейтрального, ионного и электронного газов. Эти компоненты могут иметь различающиеся температуры: T_q , T_i и T_e . Газы нейтральный и ионный ввиду приблизительно одинаковых размеров частиц имеют практически одинаковую температуру. Плазма, в которой

температура газов равна ($T_g = T_i = T_e = T$), называется изотермической или равновесной. Получению изотермической плазмы способствует повышение давления газа и силы тока. В обычной сварочной дуге, горящей при атмосферном давлении, плазму можно считать изотермической.

Термическую ионизацию описывают следующим уравнением:



где A^0 – нейтральная газовая частица;

A^+ – положительно заряженный ион;

e_0 – электрон, образовавшийся в результате термической ионизации.

Степень ионизации α характеризуется отношением числа образовавшихся заряженных частиц к общему числу нейтральных частиц, существовавших в данном объеме газа до ионизации.

Для изотермической плазмы индийский физик М. Н. Сага на основании теоретических рассуждений, пренебрегая процессами возбуждения, многократной ионизации и диссоциации многоатомных молекул и рассматривая лишь процесс однократной ионизации, вывел зависимость степени ионизации равновесной плазмы в дуге от температуры и потенциала ионизации:

$$\frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} p = 2,4 \cdot 10^{-4} T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{eU_{\text{ион}}}{kT}\right), \quad (2)$$

где α – степень ионизации;

p – давление газа, мм. рт. ст.;

T – температура газа, К;

k – константа Больцмана;

$eU_{\text{ион}}$ – работа ионизации.

Кривые изменения степени ионизации газов в зависимости от температуры приведены на рис. 5.

При сварке дуга формируется из нескольких веществ в газовой фазе, поэтому чаще всего в расчетах используют так называемую эффективную энергию ионизации ($U_{\text{эф}}$) смеси газов, которая вычисляется по правилу долевого вклада от каждого вида частиц.

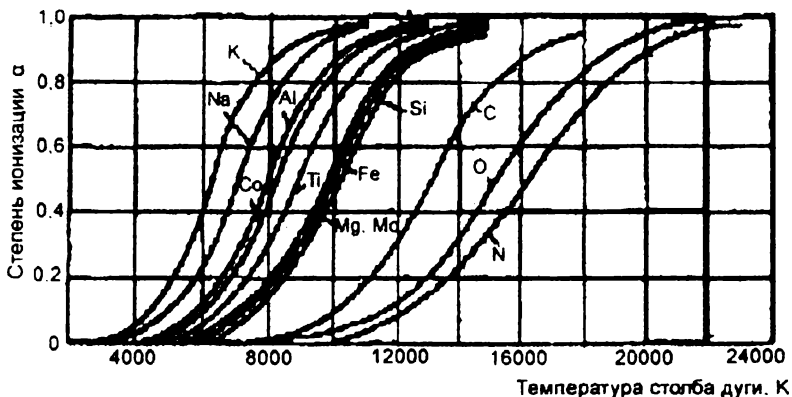


Рис. 5. Температурная зависимость степени ионизации для различных элементов

В. В. Фроловым с учетом некоторых допущений были предложены следующие уравнения для расчета величин эффективного потенциала $U_{\text{эф}}$ и эффективной степени ионизации $\alpha_{\text{эф}}$:

$$U_{\text{эф}} = -\frac{T}{5800} \ln \sum_{i=1}^k c_i^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right), \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{эф}} = 2,2 \cdot 10^2 T^4 p_0^2 \sum_{i=1}^k c_i^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right)$$

где c_i – газовые концентрации i -го газа;

U_i – потенциал ионизации i -го газа.

Исследуя уравнение (3), обратим внимание на то, что наибольшее влияние на значение $U_{\text{эф}}$ оказывает сумма $\sum_{i=1}^k c_i^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right)$.

Следовательно, значение эффективного потенциала ионизации в большей степени зависит от компонентов, обладающих низкими потенциалами ионизации, т. е. при их достаточной концентрации эффективный потенциал газовой смеси будет стремиться к значению потенциала ионизации наиболее легко ионизирующегося компонента.

При введении в атмосферу дуги уже сравнительно небольшого количества вещества с низкой $U_{\text{ион}}$ эффективная энергия ионизации смеси

значительно снижается по сравнению с потенциалом ионизации газов, входящих в смесь, что обеспечивает стабильное горение дуги. Например, в смеси, состоящей из азота, кислорода и паров железа и кальция, при температуре 5000 °С соотношение степеней ионизации будет следующим: $\alpha_{Ca} : \alpha_{Fe} : \alpha_O : \alpha_N = 1 : 1,74 \cdot 10^{-2} : 3,24 \cdot 10^{-8} : 6,63 \cdot 10^{-11}$. Практически ионизированы будут только пары кальция, потенциал ионизации которых имеет самое низкое значение, и он будет определять эффективный потенциал этой газовой смеси.

Процессы ионизации, как и процессы диссоциации, протекают с поглощением энергии, и на их развитие влияет температура дугового промежутка. Чем ниже эффективный потенциал ионизации газовой смеси, тем вероятнее процесс ионизации и тем больше будет поглощение энергии в дуговом промежутке. Расход энергии на ионизацию q в дуговом промежутке можно рассчитать по следующей формуле:

$$q = \sum_{i=1}^k e_0 U_i \alpha_i, \quad (4)$$

где $e_0 U_i$ – работа ионизации на 1 моль газа;

α_i – степень ионизации i -го газа.

Приближенная зависимость, связывающая температуру столба дуги с эффективным (результатирующим) потенциалом ионизации газовой смеси в столбе дуги, была представлена К. К. Хреновым при исследовании уравнения Сага (2) с учетом допущений, что столб дуги теряет энергию только посредством излучения и плотность тока по его сечению распределена равномерно:

$$T = 800 U_{\text{эф}},$$

где T – температура столба дуги;

$U_{\text{эф}}$ – эффективный потенциал ионизации дугового газа.

По расчетам В. В. Фролова [17] для дуги под слоем флюса коэффициент пропорциональности выше и равен 1050÷1100, таким образом, уравнение имеет вид

$$T = (1050 \div 1100) \cdot U_{\text{эф}}.$$

Наиболее надежным и точным способом измерения температуры дуги считается спектральный способ, основанный на измерении и сравнении яркости спектров различных атомов (часто за основу берут спектральные линии железа). Распределение температуры в столбе дуги (рис. 6) показывает, что температура в поперечном сечении меняется очень быстро от наивысшего значения 12000 °С в центре (по оси дуги) до 500 °С на периферии. В среднем температуру столба дуги считают равной 5000–6000 °С.

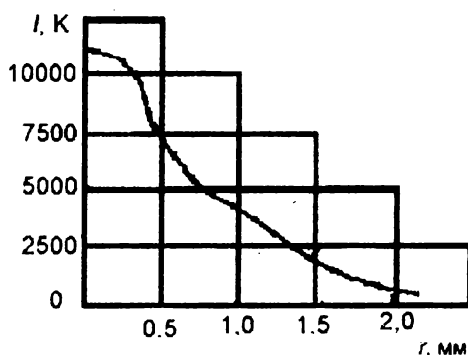


Рис. 6. Радиальное распределение температуры в дуге

По экспериментальным данным [11], температура дуги, горящей между железными электродами в атмосфере воздуха, составляет 6100–8250 °С.

В области столба дуги для поддержания равновесного состояния наряду с процессами термической диссоциации, возбуждения и ионизации идут обратные процессы – рекомбинации, деионизации, т. е. переход частиц в электрически нейтральное состояние. Благодаря этому в объеме столба дуги имеются как заряженные частицы, так и нейтральные, их количество зависит от степени ионизации газа. Алгебраическая сумма зарядов этих частиц в любой момент времени равна нулю. Подобный объем газа с равными количествами разноименных зарядов не создает электрического поля во внешнем пространстве, этот газ проявляет себя по отношению к внешнему пространству как нейтральный газ, почему и называется *квaziнейтральным*. Такой достаточно ионизированный и квазинейтральный газ получил название

плазмы. В зависимости от ионизации молекул и атомов газа различают низкотемпературную (электронную) плазму (5000–25000 К), где степень диссоциации α составляет 0,1–5%, и высокотемпературную плазму (1000000–6000000 К), где $\alpha = 100\%$. Таким образом, сварочная дуга представляет собой низкотемпературную плазму.

В электронной плазме не могут существовать большие разности потенциалов ввиду ее весьма значительной электропроводности, приближающейся к электропроводности металлов, за исключением областей искажения поля у электродов и стенок, ограничивающих плазму. Возникшие разности потенциалов быстро выравняются соответствующим передвижением заряженных частиц. В стационарных разрядах плазма имеет неизменную во времени концентрацию заряженных частиц; убыль заряженных частиц непрерывно восполняется в результате процесса ионизации. В состоянии электронной плазмы находится газ столба дугового разряда при атмосферном давлении.

2.3. Процессы на аноде и в анодной области

На аноде металлической сварочной дуги происходят следующие основные процессы. Поверхность анода бомбардируется электронами плазмы положительного столба и нейтральными частицами газа. Бомбардировка разогревает поверхность анода как за счет работы выхода нейтрализуемых электронов, так и за счет их кинетической энергии.

Энергия, получаемая анодом, расходуется главным образом на плавление и испарение материала анода, на излучение и на теплоотдачу в массу металла анода. Как правило, анод в сварочной дуге получает больше тепловой энергии, чем катод, хотя, по-видимому, это правило не является строго обязательным и возможно обратное соотношение количества тепла, получаемого электродами.

Так как обычно анод получает больше тепла, то можно предположить, что материал анода испаряется особенно интенсивно и пары материала анода играют преобладающую роль в создании газовой среды положительного столба.

Материал электродов металлической сварочной дуги оказывает существенное влияние на ее свойства, причем это влияние может быть весьма разнообразным. Свойства дуги зависят от температуры плавления, теплоты плавления, тепло- и температуропроводности материала,

температуры его кипения и теплоты испарения. Например, чем выше температура плавления материала электрода, тем обычно благоприятнее условия горения дуги, так как чрезмерно легкоплавкий электродный стержень дает слишком большое количество холодного расплавленного металла, проходящего через положительный столб дуги и охлаждающего его. Высокая температуропроводность электродного металла также усиливает охлаждение дуги и тем самым затрудняет ее горение.

Не менее существенна испаряемость материала электрода, в свою очередь, определяемая комплексом физических свойств: температурой кипения, формой кривой упругости паров, теплотой испарения и т. д. Металлические электроды обычно дают пары с невысоким потенциалом ионизации, и в большинстве случаев увеличение испаряемости электродного материала повышает устойчивость дуги.

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните явление эмиссии электронов. В какой области дуги данный процесс осуществляется?
2. Возможно ли сравнить эмиссионную способность материалов, используемых при сварке? Каким образом?
3. Какой из механизмов эмиссии преимущественно реализуется при использовании легкоплавких материалов?
4. Дайте характеристику процесса ионизации. В какой области дуги возможен процесс ионизации?
5. Почему состояние дугового газа называют плазмой?
6. Что называют степенью ионизации газа? Согласно какому уравнению эту величину можно определить в состоянии термодинамического равновесия дугового газа?
7. Можно ли повлиять на степень ионизации дугового газа?
8. Почему используют понятие «эффективный потенциал ионизации»? От чего зависит этот потенциал?
9. От каких факторов зависит температура столба дуги и каково ее значение?
10. Каким образом определяют температуру дуги?
11. Наличием каких процессов характеризуется анодная область дуги?
12. Чем обусловлена более высокая температура анода относительно температуры катода?

3. НЕОДНОРОДНОСТЬ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

3.1. Вольт-амперная характеристика сварочной дуги

Для исследований и практического применения чрезвычайно важна вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги $U_d = \varphi I_d$. ВАХ представляет собой нелинейную зависимость, не отвечающую в широком диапазоне классическому закону Ома для электрической цепи: $U_d = I_d R_d$.

Многие исследователи пытались математически выразить эту зависимость. Однако разнообразие параметров дуги не позволяет предложить единую формулу. Для дуги при небольших силах тока, горящей в воздухе между угольными электродами, предложена следующая эмпирическая формула, связывающая параметры дуги:

$$U_d = a + bl + \frac{c + dl}{I}, \quad (5)$$

где U_d – напряжение на дуге;
 I – сила тока;
 l – длина дуги;
 a, b, c и d – постоянные.

Для дуги в воздухе между металлическими электродами формула (5) имеет вид

$$U_d = a + bl + \frac{c + dl}{I^n},$$

где n изменяется в пределах 0,34–1,38.

Дуга является объемным газовым проводником электрического тока, поэтому для нее характерна нелинейная зависимость сопротивления дуги от величины электрического тока: $R_d = f(I_d)$.

В вольт-амперной характеристике дуги (рис. 7) условно различают три области.

Область I (малые токи) – *падающая* характеристика. С возрастанием силы тока (I_d) происходит увеличение площади сечения стол-

ба дуги ($S_{ст}$) и его электропроводности ($\chi_{дл}$), в связи с этим резко возрастает проводимость дуги, что приводит к уменьшению ее сопротивления ($R_{д}$) и падению напряжения ($I_{д}\uparrow \Rightarrow S_{ст}\uparrow, \chi_{дл}\uparrow \Rightarrow R_{д}\downarrow\downarrow \Rightarrow U_{д}\downarrow$). Дуга с падающей характеристикой находит ограниченное применение в сварочной технике из-за малой ее устойчивости.

Область II (средние токи) – *пологая* (жесткая) характеристика. Увеличение силы тока не приводит к изменению напряжения дуги. Это объясняется тем, что при данных условиях площадь сечения столба дуги и активных пятен возрастает пропорционально силе тока, следовательно, плотность тока и падение напряжения во всех участках дуги остаются постоянными. Дуга с такой характеристикой находит весьма широкое применение в сварочной технике.

Область III (большие токи) – *возрастающая* характеристика. Степень ионизации столба дуги высока. Дуга полностью насыщена зарядами, площадь ее сечения максимальна, что устанавливает постоянное сопротивление. Напряжение приближается к линейному и возрастает с увеличением тока. Дуга с такой характеристикой широко используется при автоматической сварке под флюсом и в защитных газах.

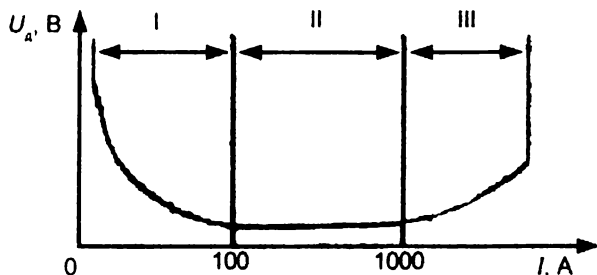


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика дуги

При переходе к дуге с другим значением длины положение ВАХ изменится лишь на величину дополнительного падения напряжения на этом участке дуги. ВАХ как бы сместится на графике параллельно самой себе.

Каждому участку ВАХ дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: областям I и II – крупнокапельный перенос, области III – мелкокапельный и струйный.

3.2. Распределение электрического поля дуги

В силу того что процессы, происходящие на электродах и в приэлектродных областях, различны по своей природе, электрическое поле на участке «поверхность катода – поверхность анода» неравномерно. Оно характеризуется падениями напряжения в трех характерных областях дугового промежутка: $U_{ан}$, $U_{кат}$, $U_{ст}$. Общее падение напряжения на дуге равно $U_d = U_{ан} + U_{кат} + U_{ст}$.

Электрический ток является результатом перемещения электрически заряженных частиц в дуге, и в силу своей подвижности электроны в газе переносят большую часть электрического заряда. Доли электронного (f) и ионного ($1 - f$) тока изменяются в различных местах дугового разряда. Доля электронного тока должна иметь большее значение на аноде, а доля ионного тока – на катоде.

Энергетический баланс дугового разряда при его достаточной сложности возможно представить через энергетические балансы, имеющие место в его областях.

3.2.1. Схема энергетического баланса на катоде

В катодной области дуги существует скачок потенциала, называемый *катодным падением напряжения*. В этой области происходит генерация и перенос заряженных частиц между катодом и столбом дуги. Катодное падение напряжения ускоряет ионы, движущиеся к катоду, обеспечивает эмиссию электронов благодаря повышенной температуре поверхности, бомбардируемой ионами, создает у поверхности катода сильное электрическое поле, ускоряет эмитированные электроны до уровней энергии, необходимой для образования заряженных частиц в прикатодной области.

В материале катода и слоях катодной зоны протекают сложные и взаимосвязанные процессы: нагрев катода проходящим током и теплотой поверхностных источников; испускание поверхностью катода атомов и электронов; нейтрализация ионов; аккомодация атомов, электронов и ионов на поверхности катода и передача ей энергии; образование избыточного пространственного заряда и скачка потенциала перед катодом, ускорение ионов и эмитированных электронов в зоне пространственного заряда, торможение «обратных» электронов; возбуждение и ионизация атомов, рекомбинация заряженных частиц; формирование потоков ионов и «обратных» электронов.

Все катодные процессы представляют собой цепь связанных физических явлений, протекающих одновременно в теле катода, на его поверхности и в катодной области дуги.

Расход энергии на катоде рассчитывается с учетом происходящих процессов:

1. Создание эмиссии электронов. Каждый электрон, эмитируемый с поверхности катода, уносит с собой энергию, равную работе выхода, и некоторый запас кинетической энергии, в совокупности составляющие следующую величину: $\varphi + 2kT$.

Умножая эту величину на число электронов в секунду ($f \frac{I}{e}$), получаем расход мощности на эмиссию электронов, равный $\varphi + 2kT(f \frac{I}{e})$.

Мощность, отнесенная к одному амперу сварочного тока, представляет собой падение потенциала:

$$U_{эм} = \varphi + 2kT \cdot f,$$

где $U_{эм}$ – падение потенциала на катоде за счет эмиссии электронов, В.

2. Плавление металла электрода. Расход энергии в секунду при этом составляет

$$q_{плав} = \frac{\alpha_p \cdot \Delta H}{3600 \cdot 0,24},$$

где $q_{плав}$ – удельная теплота расплавления, Дж/(А · с);

α_p – коэффициент расплавления металла электрода, г/(А · с);

ΔH – теплосодержание расплавленного электродного металла, Дж/г.

Подставляя числовые значения, можно рассчитать

$$q_{плав} = 0,642 \alpha_p.$$

Приход энергии обеспечивают:

1. Работа тока, проходящего через электрод. Эта статья прихода учитывается главным образом при ручной дуговой сварке, так как при автоматической сварке вылет электрода очень невелик. Приход тепла рассчитывается по формуле

$$q_{тока} = I^2 R_t = IU_{тока} t.$$

Приход тепла, отнесенный на один ампер в одну секунду, составляет

$$q_{\text{тока}} = U_{\text{тока}}.$$

2. Приход тепла от положительно заряженных ионов из столба дуги. Каждый ион отдает катоду свою кинетическую энергию и энергию, равную работе ионизации, что в совокупности составляет $eU_{\text{ион}} + 2kT$.

Приход энергии в одну секунду на один ампер тока составит

$$q_{\text{ион}} = (eU_{\text{ион}} + 2kT)(1 - f),$$

где $(1 - f)$ – доля ионного тока.

3. Приход тепла от излучения дуги. Так как температура катода значительно ниже, чем температура столба дуги, то в уравнении, выражающем закон Стефана – Больцмана, можно пренебречь температурой катода:

$$q_{\text{излуч}} = C(T_{\text{д}}^4 - T_{\text{кат}}^4)\varphi = C\varphi T_{\text{д}}^4,$$

где C – коэффициент черноты поверхности катода;

$T_{\text{д}}, T_{\text{кат}}$ – температуры соответственно столба дуги и катода, К;

φ – телесный угол, определяемый сечением катода.

Таким образом, на катодном пятне происходит как выделение энергии, так и ее расходование. Энергия затрачивается на эмиссию электронов, нагрев, плавление и испарение материала электрода и на неизбежные потери, что влияет на величину общего падения потенциала на катоде:

$$U_{\text{кат}} = U_{\text{эм}} + U_{\text{плавл}} - (U_{\text{ион}} + U_{\text{тока}} + U_{\text{излуч}}).$$

Катодное падение напряжения для различных металлов определено И. Г. Кесаевым [10].

Катодное падение напряжения для различных металлов катода указано ниже:

Материал электрода	Сталь	Медь	Алюминий
Катодное падение потенциала, В	8–12	12–13	13–14

Установлена связь минимального катодного падения напряжения с потенциалом ионизации паров металла [10]. Для металлов пер-

вой группы Периодической системы элементов Менделеева в условиях вакуумной дуги установлено, что отношение минимального катодного падения напряжения к потенциалу ионизации ($U_{\text{кат}}/U_{\text{ион}}$) составляет 1,7–3, а для металлов второй группы – 0,7–1,3. Такое различие значений $U_{\text{кат}}/U_{\text{ион}}$ объясняется тем, что у металлов первой группы происходит прямая ионизация паров в катодной области дуги, а у металлов второй группы – ступенчатая ионизация благодаря наличию у них метастабильных уровней. Установлено также уменьшение отношения $U_{\text{кат}}/U_{\text{ион}}$ при увеличении атомной массы металла катода.

Катодное падение напряжения зависит от теплофизических свойств материала катода и растет с увеличением произведения условной температуры кипения на теплопроводность [9]. Исключение составляют ферромагнитные металлы, у которых наблюдается повышенное катодное падение напряжения. Нагрев выше точки Кюри и потеря ферромагнитных свойств приводят к уменьшению $U_{\text{кат}}$.

Существует мнение, что минимальное катодное падение напряжения равно сумме потенциала ионизации $U_{\text{ион}}$ и потенциала выхода электрона ϕ_3 :

$$U_{\text{кат min}} = U_{\text{ион}} + \phi_3.$$

3.2.2. Схема энергетического баланса в столбе дуги

Расход энергии в столбе дуги прямо пропорционален его объему, заключенному между электродами, и определяется его протяженностью. Потеря энергии на излучение связана с величиной поверхности столба дуги и возрастает с увеличением длины дугового промежутка.

Работа перемещения в столбе дуги заряженных частиц ионов и электронов прямо пропорциональна длине дуги. Высокая подвижность частиц в ионизированном газе выравнивает изменение потенциала и делает его постоянным по длине дугового столба. Таким образом, падение потенциала в столбе дуги U_d определяется по формуле

$$U_d = bL,$$

где b – градиент падения потенциала, В/мм;
 L – длина дуги, мм.

Величина градиента падения потенциала зависит от состава дуговой атмосферы. Введение в дуговой промежуток легко ионизирующихся веществ повышает значение величины градиента падения потенциала (b), что связано с увеличением поглощения энергии процессами ионизации. Например, при возбуждении дуги в парах $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ величина b составила 3,3–3,5 В/мм, а при использовании кварцевого песка SiO_2 значение b было равно 1,9–2,1 В/мм. Следовательно, процессы ионизации поглощают значительное количество энергии.

В среднем падение потенциала в дуговом промежутке составляет 3,0–3,5 В/мм. В инертных газах градиент падения потенциала имеет более низкое значение (1–2 В/мм).

3.2.3. Схема энергетического баланса на аноде

Извлечение электронов анодом из электронной плазмы положительного столба вызывает искажение электрического поля в анодном пространстве и появление объемного заряда, создаваемого как электронами, так и медленно передвигающимися положительными ионами. Искажение поля в анодной области и вызванное им анодное падение может быть положительным и отрицательным.

Возникновение анодного падения происходит следующим образом. Плотность тока на аноде может быть такова, что анод отсасывает из анодной области больше электронов, чем их может дать положительный столб посредством тепловой диффузии и нормальной напряженности поля положительного столба. Тогда анодная область беднеет электронами и в ней появляется положительный объемный заряд, создающий положительное анодное падение, ускоряющее движение электронов и пополняющее их убыль в анодной области. Положительное анодное падение повышает общее напряжение на дуге. Если анодная плотность тока отбирает из анодной области меньше электронов, чем их подается при нормальной напряженности поля положительного столба, то в анодной области появляется избыток свободных электронов, создающий отрицательный объемный заряд в анодной области. Анодное падение становится отрицательным. Анодная область, имея большую протяженность по сравнению с катодной, характеризуется меньшей напряженностью поля.

Подробный расчет энергетического баланса на аноде представлен следующими этапами.

Приход энергии обеспечивают:

1. Работа входа электронов в анод, предполагающая передачу электронами металлу своей кинетической энергии ($2kT$) и энергии, равной работе выхода электрона (ϕ_3).

Так как на аноде доля электронного тока близка к единице, то изменение потенциала будет равно

$$U_{\text{электр}} = 2kT + \phi_3.$$

2. Поступление значительного количества тепла к каплям расплавленного электродного металла, нагретого значительно выше температуры плавления, во время прохождения его через дуговой промежуток.

$$q_{\text{мет}} = K\alpha_n,$$

где K – коэффициент, определяемый теплосодержанием металла, поступающего через дуговой промежуток в сварочную ванну;
 α_n – коэффициент наплавки.

3. Излучение дуги. Оно будет примерно равно излучению на катоде, так как телесный угол мало изменится за счет увеличения поверхности катода.

$$q_{\text{изл}} = C\phi'T_d^4,$$

где C – коэффициент черноты поверхности анода;
 T_d – температура столба дуги, К;
 ϕ' – телесный угол, определяемый сечением анода.

Расход энергии включает:

1. Расход энергии на расплавление основного металла

$$q_{\text{осн}} = K\alpha_p,$$

где $q_{\text{осн}}$ – удельное количество тепла, расходуемое на расплавление основного металла;
 α_p – коэффициент расплавления основного металла.

2. Расход энергии на нагрев изделия (анода). Величина теплоотвода в изделие значительно изменяется в зависимости от условий сварки, а также от вида металла изделия. Таким образом, количество отведенного тепла учитывается в каждом конкретном случае.

Общее падение потенциала на аноде будет складываться из следующих величин:

$$U_{\text{ан}} = U_{\text{расплавления оси металла}} + U_{\text{теплоотвода}} - U_{\text{электр}} - U_{\text{изл.}}$$

В среднем падение напряжения на аноде составляет 2,5–3 В.

Опираясь на вышеизложенные рассуждения, рассчитывают ориентировочное общее напряжение на дуге $U_{\text{д}}$, которое равно алгебраической сумме падений напряжения в столбе дуги $U_{\text{ст}}$, в катодной $U_{\text{кат}}$ и анодной $U_{\text{ан}}$ областях.

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ст}} + U_{\text{кат}} + U_{\text{ан.}}$$

Сравнивая значения падения потенциала в областях дуги, можно констатировать, что они, во-первых, различны по величине (это обусловлено разной природой и характером процессов, идущих в данных областях); во-вторых, соотносятся следующим образом: $U_{\text{кат}} > U_{\text{ст}} > U_{\text{ан}}$. Распределение падения напряжения в дуге представлено на рис. 8.

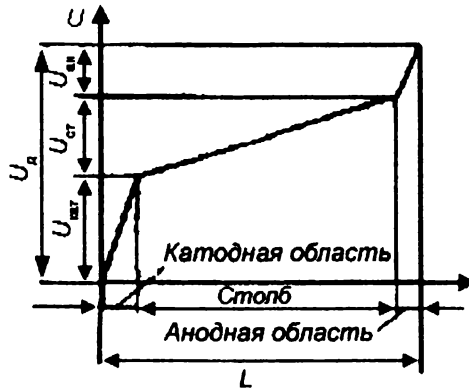


Рис. 8. Распределение падения напряжения в дуге

Напряжение дуги возможно приближенно определить по уравнению, предложенному К. К. Хреновым, которое дает удовлетворительные результаты при небольших значениях силы тока (100–300 А).

$$U_d = a + bL,$$

где a – сумма катодного и анодного падения потенциала, В;

b – градиент падения потенциала, В/мм;

L – длина дуги, мм.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем обусловлена нелинейность вольт-амперной характеристики дуги?
2. Каким образом изменяется сопротивление электрической дуги при увеличении силы тока?
3. Каким образом распределено электрическое поле дуги?
4. Как распределяется энергия в катодной области дуги?
5. Как распределяется энергия в анодной области дуги?
6. Почему значение потенциала в катодной области отличается от значения потенциала в анодной области?

4. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СВАРОЧНУЮ ДУГУ

4.1. Влияние собственного магнитного поля дуги

Устойчивость сварочной дуги и возможность направления ее в определенное место при сварке постоянным током зависят от направления действия собственного магнитного поля дуги. Под *собственным магнитным полем* принято понимать круговое магнитное поле тока, возникающее при его прохождении по элементам сварочной цепи, в том числе и по основному металлу.

Столб сварочной дуги является газовым проводником электрического тока, который под воздействием собственного магнитного поля отклоняется в сторону наименьшего сгущения магнитных силовых линий. Такое явление называют *магнитным дутьем*. Яркие смещения и изменения геометрии дуги показаны на рис. 9. Их можно объяснить, наблюдая воздействие собственного магнитного поля дуги, силовые линии которого концентрически размещены вокруг дуги в соответствии с «правилом буравчика». В случае, представленном на рис. 9, а, они создают равное магнитное поле по радиальным направлениям от дуги. В случаях, показанных на рис. 9, б и в, плотность распределения силовых линий магнитного поля неодинакова, и возникающий градиент индукции приводит к смещению дуги, ее «сдуванию» от осевой линии электрода. Причина этого явления – в несимметричности токоподвода относительно места сварки.

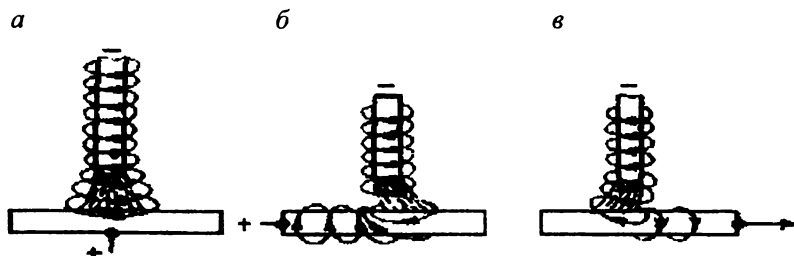


Рис. 9. Влияние положения токоподвода на отклонение дуги:
а – симметричный токоподвод к месту сварки; б, в – несимметричные токоподводы к месту сварки

Способы устранения влияния магнитного дутья:

- изменение места подвода тока до более симметричного относительно дуги (см. рис. 9, а);
- использование сварочного контура, более симметричного по токоподводу;
- регулировка угла наклона электрода к поверхности изделия (рис. 10, а);
- использование дуги косвенного действия (рис. 10, б);
- использование сварки на переменном токе;
- использование ферромагнитных масс (металлических балластных болванок).

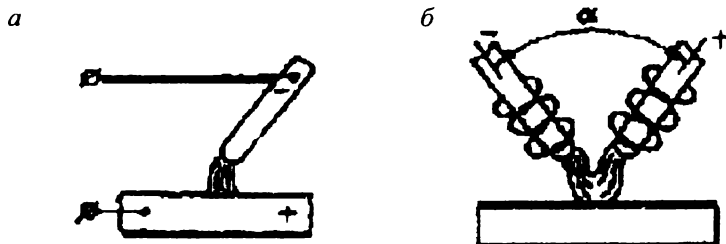


Рис. 10. Способы устранения влияния магнитного дутья:
а – регулировка угла наклона электрода; б – использование дуги косвенного действия

4.2. Воздействие посторонних магнитных полей на сварочную дугу

Внешнее магнитное поле по отношению к оси столба дуги может быть либо продольным, либо поперечным.

Продольное магнитное поле получают с помощью соленоида, включенного в сварочную цепь. Соленоид – устройство, в котором магнитное поле создается током, проходящим через витки проводника, намотанного на цилиндрическую поверхность. Внешнее поле соленоида подобно полю прямого постоянного магнита.

При наложении продольного поля направления магнитного поля соленоида и электрического поля дуги совпадают (рис. 11), поэтому

на поступательное движение заряженных частиц в дуге магнитное поле соленоида влиять не будет.

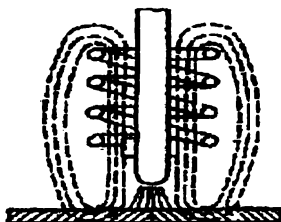


Рис. 11. Схема продольного магнитного поля, наложенного на сварочную дугу

Однако на заряженные частицы, двигающиеся в дуге в радиальном направлении поперек электрического поля, оно оказывает заметное влияние. Электроны и ионы кроме поступательного движения совершают еще хаотическое движение и обладают тепловой скоростью хаотического движения и скоростью амбиполярной диффузии. *Амбиполярная диффузия* – процесс одновременного перемещения в ионизированной среде заряженных частиц (ионов и электронов) в направлении падения их концентраций.

В результате теплового движения заряженных частиц, направление которого совпадает с изменением температуры (от высокой к низкой) – от оси дуги к ее периферийным участкам, и процесса амбиполярной диффузии, направление которого совпадает с направлением теплового движения, заряженные частицы начинают двигаться не только поступательно (между электродами), но и от оси дуги к периферии (рис. 12). На это сложное движение оказывает воздействие внешнее магнитное поле, оно искривляет путь частиц и заставляет их двигаться по радиусу, т. е. частицы столба дуги вращаются по окружности вокруг оси дуги.

В обычных сварочных дугах при атмосферном давлении наибольшее влияние внешнее продольное поле оказывает на диффузионную составляющую скорости ионов и электронов. Скорость их диффузии направлена по радиусу от центра дуги к периферии, где температура и концентрация меньше. В связи с тем что скорости диффузии электронов и ионов в квазинейтральном столбе дуги равны $v_e \approx v_i$, а их массы

значительно отличаются ($m_e \ll m_i$), импульсы, передаваемые нейтральным частицам от ионов, будут в тысячи раз больше, чем передаваемые от электронов. Поэтому плазма дуги придет во вращательное движение, соответствующее движению в магнитном поле ионов, более массивных частиц. Столб дуги будет вращаться против часовой стрелки, если смотреть по направлению поля. Вследствие этого сечение столба дуги уменьшается, она становится более жесткой, а нагрев более концентрированным, что улучшает технологические свойства дуги.

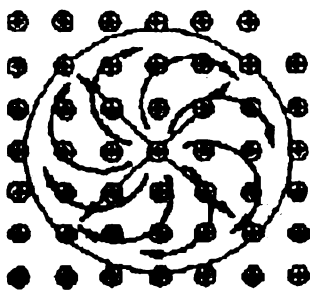


Рис. 12. Схема движения положительно заряженных ионов в дуге при наложении продольного магнитного поля

Поперечное магнитное поле создается подковообразным магнитом (рис. 13). Оно взаимодействует с кольцевым магнитным полем, возникающим вокруг дуги при прохождении электрического тока. В результате этого увеличивается напряженность поля с той стороны дуги, где направление силовых линий совпадает, а со стороны, где силовые линии встречаются, напряженность поля уменьшается (рис. 14). Появляется результирующая электромагнитная сила, которая отклоняет дугу в сторону.

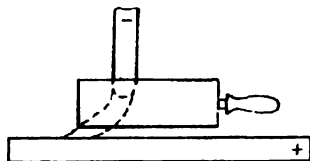


Рис. 13. Схема наложения магнитного продольного поля на электрическую дугу

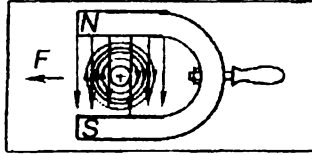


Рис. 14. Схема воздействия магнитного продольного поля на собственное магнитное поле дуги

На направление отклонения дуги влияет полярность подключения и направление постороннего магнитного поля. Если постороннее поле достаточно сильно, оно может оборвать дугу. Под действием магнитного поля небольшой напряженности дуга будет отклоняться до тех пор, пока не наступит равновесие действующих сил. Равновесие наступает вследствие того, что с отклонением дуги от нормального положения происходит ее деформация и магнитные поля с обеих сторон дуги уравниваются.

4.3. Влияние ферромагнитных масс

Наличие значительных ферромагнитных масс вблизи дуги может также вызвать ее отклонение. Ферромагнитные массы благодаря своей высокой магнитной проницаемости концентрируют магнитные силовые линии сварочного контура. Вследствие этого магнитное давление со стороны ферромагнитной массы снижается и дуга отклоняется в сторону ферромагнитной массы. Это свойство дуги проявляется при сварке соединений встык. Характерно, что влияние на дугу ферромагнитной массы может оказаться более интенсивным, чем влияние собственного магнитного поля дуги.

Вопросы для самоконтроля

1. Как возникает собственное магнитное поле дуги?
2. Какими способами можно регулировать нежелательное воздействие собственного магнитного поля дуги?
3. Каким образом ведет себя дуга при наложении внешнего продольного магнитного поля?
4. Какое явление называют амбиполярной диффузией?
5. Как внешнее поперечное магнитное поле влияет на сварочную дугу?

5. УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ ДУГИ

Устойчивость дугового разряда измеряется величиной *обрывной длины дуги* ($L_{о.д.д}$). Это максимальное расстояние между электродами, при дальнейшем увеличении которого дуга гаснет. На данную величину влияют следующие факторы:

1. Сопротивление дугового промежутка, которое зависит от количества и подвижности заряженных частиц в единице объема газа дугового промежутка. Для обеспечения стабильного горения дуги необходимо, чтобы в дуговом промежутке находилось большее количество заряженных частиц (электронов и ионов). Это достигается введением в дуговой промежуток элементов, обладающих низкими потенциалами ионизации (калий, кальций, магний, натрий и т. п.), в результате чего снижается эффективный потенциал ионизации газовой смеси ($U_{эф}$). Данное явление широко используют в сварочной практике путем введения в состав электродных покрытий и сварочных флюсов легкоионизирующихся компонентов.

Кроме того, положительное действие элементов-ионизаторов связывают с их влиянием на работу выхода электрона ϕ , поскольку значение ϕ , тесно связано с потенциалом ионизации. Пары веществ-ионизаторов попадают в зону катода, уменьшают работу выхода электрона, что снижает катодное падение, повышает электропроводность катодной области и устойчивость дуги в целом. Анодное падение при этом мало изменяется и составляет в металлических дугах $2,5 \pm 0,5$ В. Уменьшение катодного и анодного падений напряжения повышает градиент напряжения в дуге. Это облегчает сварку на автоматах с регуляторами напряжения дуги. Введение элементов-ионизаторов уменьшает мощность, выделяемую в приэлектродных областях, и увеличивает долю энергии, затраченной в столбе дуги. Производительность проплавления при этом снижается.

2. Величина напряжения холостого хода источника питания. Для поддержания дуги переменного тока требуется источник питания с напряжением холостого хода, которое выше напряжения пика зажигания дуги примерно в 2 раза.

3. Материал электродов. Обладая разной работой выхода электрона, материалы электродов при низком значении работы выхода

электрона будут способствовать снижению анодного и катодного падений потенциала, что обеспечит устойчивое горение дуги. Кроме того, материалы электродов имеют различные теплофизические характеристики (температура плавления, температура кипения, коэффициент теплопроводности и пр.), благодаря которым возможно поддержание высокой температуры нагрева катода, а значит, и устойчивости дугового разряда.

4. Сила тока.
5. Электрические параметры сварочной цепи.
6. Собственное магнитное поле сварочной дуги.
7. Внешние наведенные магнитные поля.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие факторы влияют на устойчивость горения дуги?
2. Каким образом возможно регулирование устойчивости горения дуги?
3. Какова оценка устойчивости горения дуги?
4. При одинаковой длине дуги устойчивее горит дуга с алюминиевым электродом или со стальным?
5. Каким образом сила тока может повлиять на устойчивость горения дуги?
6. Неплавящиеся вольфрамовые электроды активируют добавками тория, иттрия и лантана. Как это влияет на устойчивость горения дуги?

6. СВАРОЧНАЯ ДУГА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ. ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА ЧЕРЕЗ ДУГУ

При сварке плавящимся электродом дуга горит между основным металлом и металлическим стержнем определенного химического состава, подаваемым в зону дуги по мере плавления. Шов образуется за счет расплавления металла изделия и электрода. Перенос металла может происходить либо в виде жидких капель различных размеров, либо в виде пара.

Силы, действующие на каплю на конце электрода при его плавлении в процессе сварки, весьма сложны.

При сварке плавящимся электродом капля электродного металла формируется под совместным действием следующих сил:

1. *Сила тяжести F_m* . Металлы относятся к довольно плотным веществам, поэтому на формирующиеся и перемешивающиеся капли действует сила тяжести.

$$F_m = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \gamma q,$$

где m – масса капли электродного металла;
 q – ускорение свободного падения;
 r – радиус капли электродного металла;
 γ – плотность электродного металла.

При сварке в нижнем положении эта сила способствует отрыву капель от торца электрода и их переносу. При сварке в потолочном положении она препятствует переносу металла.

2. *Сила поверхностного натяжения F_σ* . Ее влияние неоднозначно. На стадии образования капли она препятствует развитию поверхности капли с торца электрода, создавая по периметру суммарный вектор сил, направленных против необходимого перемещения капли. В этом случае должно выполняться условие

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \gamma q \geq \pi d_s \sigma',$$

где d_s – диаметр капли электродного металла;
 σ' – коэффициент поверхностного натяжения на границе капли с электродом.

Но при соприкосновении капли с поверхностью расплавленного металла сварочной ванны сила поверхностного натяжения способствует переходу ее в объем расплавленного металла, так как происходит слияние близких по составу жидкостей. В результате этот процесс описывается условием, когда сумма сил тяжести и поверхностного натяжения (P_0') при образовании капли на торце электрода больше силы поверхностного натяжения при соприкосновении с поверхностью металла P_0'' .

$$P_0' = \frac{4}{3}\pi r^3 \gamma q + \pi d, \sigma',$$

$$P_0'' = \pi d, \sigma'', \quad (6)$$

где σ'' – коэффициент поверхностного натяжения на границе между каплей и сварочной ванной.

3. *Реактивные силы.* При сварке плавлением металл в дуге разогревается до очень высоких температур, близких к температуре его кипения. Атомы металла, покидая его поверхность и переходя в газ, отдают поверхности металла механический импульс и согласно 2-му закону Ньютона ($m_1 a_1 = m_2 a_2$) оказывают на поверхность капли реактивное воздействие, которое противодействует начальному обрыву капли, а затем может способствовать переносу ее в сварочную ванну.

Реактивное давление паров (P) электродов определяется массой испаряющегося металла (dm) в единицу времени (dt) с единицы площади (dS) и скоростью их истечения (v_n):

$$P = \frac{dm}{dS dt} v_n.$$

Указанные величины зависят от многих характеристик материала электродов и параметров приэлектродных областей, но каждая из них пропорциональна плотности тока. Поскольку для заданных условий горения дуги все входящие в уравнение (6) величины можно считать постоянными, то

$$P = A j^2,$$

где A – коэффициент пропорциональности;
 j – плотность тока.

Реактивную силу F_p , действующую на электроды, можно вычислить по формуле

$$F_p = PS = Aj^2S = A \frac{I^2}{S},$$

где S – площадь капли;

I – сила тока.

Анализ рассмотренных уравнений предполагает, что при увеличении силы тока реактивное давление струи пара повышается, вследствие чего происходит рост капель, но лишь до определенного предела, после которого наблюдается резкое уменьшение их размера. Объяснение этого явления находят в изменении характера сил, действующих на каплю, с учетом пинч-эффекта.

4. *Электродинамические силы.* Электрическая дуга относится к эластичным газовым проводникам электрического тока, который создает собственное магнитное силовое поле. Направление магнитных линий собственного магнитного поля определяется по «правилу буравчика».

Сила магнитного поля (сила Лоренца) оказывается направленной к центру дуги. Ее направление определяется по «правилу левой руки»: сила тока, направленная от положительного полюса к отрицательному, лежит в плоскости ладони, силовые линии магнитного поля входят в ладонь, а большой палец определяет направление силы Лоренца (рис. 15).

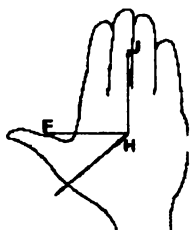


Рис. 15. Действие силы Лоренца

Таким образом, собственный магнитный поток столба дуги, силовые линии которого concentрически охватывают столб дуги, стабили-

лизирует дугу вследствие пинч-эффекта, создаваемого силой Лоренца. Объем газа в плазме за счет воздействия электродинамических сил сжат тем сильнее, чем больше величина тока.

Пинч-эффект, или сжатие проводников электродинамическими силами взаимодействия протекающих по ним токов с их магнитными полями, не зависит от природы проводников. Однако на твердых проводниках он практически не обнаруживается. Пинч-эффект вызывает сжатие газообразных цилиндрических проводников и течение газа от меньших их токоведущих сечений к большим в случае газовых проводников переменного сечения.

5. Плазменные потоки. Мощный катодный поток от электрода к изделию вызывает отраженный анодный поток, который охватывает катодную струю концентрически. Такой анодный поток затрудняет перенос металла, вызывая сдвиг капли металла в сторону или даже подъем ее над уровнем торца электрода.

Помимо перечисленных сил в ряде случаев оказывают существенное влияние сила давления струи защитного газа и инерция движения капли, а при сварке в среде многоатомных газов – дополнительное давление в зоне активного пятна, связанного с диссоциацией молекул газа.

Рассматривают 4 вида переноса электродного металла в сварочную ванну:

- крупнокапельный с короткими замыканиями разрядного промежутка;
- крупнокапельный без коротких замыканий разрядного промежутка;
- перенос каплями среднего размера без коротких замыканий;
- струйный перенос.

При крупнокапельном переносе капля сравнительно большого размера образуется на электроде постепенно и долго удерживается на нем. Если капля больше межэлектродного промежутка, то ее переход в ванну сопровождается короткими замыканиями и кратковременным погасанием дуги. Основными силами, обуславливающими крупнокапельный перенос, являются сила тяжести и сила поверхностного натяжения.

Форма и размеры капли определяются действием силы тяжести, поверхностным натяжением, силой тока и некоторыми другими факторами. Через короткий отрезок времени, зависящий от длины дуги

(рис. 16, а), капля достигает таких размеров, что касается металла в ванночке (рис. 16, б). Возникает мостик жидкого металла, замыкающий цепь короткоотка. Форма мостика зависит от плотности металла и его поверхностного натяжения.

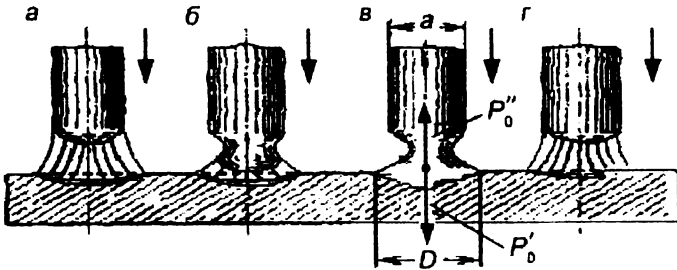


Рис. 16. Схема переноса электродного металла через дугу при сварке короткой дугой

В момент короткого замыкания напряжение падает, а сила тока резко увеличивается. В металле продолжается интенсивное выделение тепла. При этом возникает сила P_0'' (формула (6)), направленная от центра мостика вверх, одновременно возникает сила P_0' , направленная вниз (рис. 16, в). Действующая вниз сила P_0' будет больше силы P_0'' , благодаря этому и продолжающемуся нагреву и кипению металла в шейке происходит разрыв мостика. Дуга опять возбуждается, и процесс начинается вновь (рис. 16, г).

Весь процесс протекает с очень большой скоростью. Большая часть жидкого металла стекает вниз, так как в эту сторону действует сила тяжести и $P_0' > P_0''$.

С ростом длины дуги размер капель также растет до тех пор, пока длина дуги не увеличится настолько, что размер капель на электроде достигнет своих предельных значений, определяемых как весом металла, так и величиной поверхностного натяжения (рис. 17). Затем капли отрываются от электрода и свободно падают в ванночку.

Одной из важных задач является разработка способов изменения размера капель. Чем меньше размер капель, тем короче время их нахождения на торце электрода, тем быстрее они падают в сварочную ванну. Благодаря этому металл капель нагревается до более низких температур. Увеличивается скорость плавления электрода, так как пе-

редача тепла дуги твердому металлу происходит через меньший слой жидкого металла. При более мелкокапельном переносе металла улучшается стабильность горения дуги.

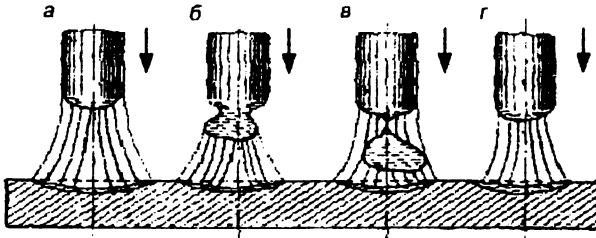


Рис. 17. Схема переноса электродного металла через дугу при сварке длинной дугой:

а, б – образование капли; *в, г* – отрыв капли и ее переход в сварочную ванну

При повышении силы тока и сохранении постоянным диаметра электродной проволоки катодное и анодное пятна начинают располагаться и на боковых поверхностях электрода (рис. 18). Благодаря этому конец электрода приобретает конусообразную форму и капли начинают образовываться в том месте, где диаметр стержня резко уменьшается. Это приводит к измельчению капель. Перенос металла через дугу приобретает мелкокапельный характер.

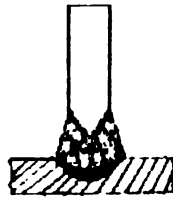


Рис. 18. Схема переноса металла через дугу при повышенной силе тока

Сварка в потолочном положении осуществляется только при короткой дуге. С увеличением длины дуги резко возрастает разбрызгивание металла, и сварка становится невозможной.

После возбуждения дуги начинается нагрев и плавление электрода и свариваемого металла (рис. 19, *а*). При постоянном перемещении электрода вверх жидкий металл капли на торце электрода сопри-

касается с металлом ванночки. Дуга потухает, происходит короткое замыкание цепи (рис. 19, б).

При соприкосновении капли жидкого металла сила P_0' будет направлена вверх. Благодаря короткому замыканию цепи сила тока увеличивается более чем в 2 раза. Сила P_0' в этот момент резко возрастает. Происходит движение металла вверх, в ванночку, и разрыв мостика (рис. 19, в). Дуга снова возбуждается, и процесс повторяется.

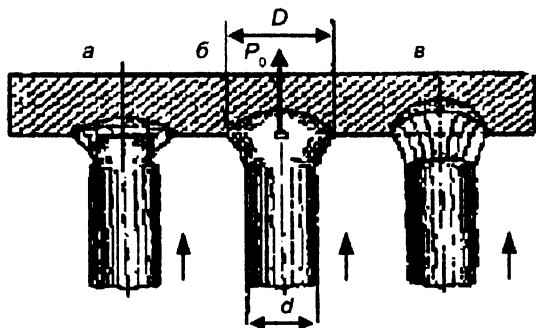


Рис. 19. Схема переноса электродного металла через дугу при сварке в потолочном положении

При отсутствии коротких замыканий нет сил, которые могли бы вызвать движение металла с электрода вверх. Сила тяжести в этом случае не способствует, а препятствует переносу металла.

С ростом температуры поверхностное натяжение расплавленного электродного металла уменьшается, с увеличением силы тока растет сжимающее действие электромагнитных сил и влияние силы тяжести в формировании капли, что способствует отделению капли от конца электрода. Поэтому с увеличением силы тока изменяется характер переноса металла от крупнокапельного к мелкокапельному, а затем при определенном значении тока, называемом критическим, — к струйному. Струйный перенос отличается высокой стабильностью размеров капель и мелким разбрызгиванием.

Таким образом, способами воздействия на характер переноса являются:

- увеличение силы тока до 200–400 А и более, что способствует переходу к мелкокапельному и струйному переносу (во многом за счет влияния пинч-эффекта);

- регулирование поверхностного натяжения металла (добавлением в атмосферу дуги поверхностно-активных веществ, таких как кислород).

Вопросы для самоконтроля

1. Какие силы препятствуют переносу капли электродного металла при сварке в потолочном положении?

2. Как действуют электродинамические силы при сварке швов в вертикальном положении?

3. Какая из рассмотренных выше сил является решающей при переносе электродного металла? Можно ли ее регулировать и как?

7. ОСОБЕННОСТИ ДУГИ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Неоднородность процессов, идущих в дуговом промежутке, обуславливает различие свойств по длине дуги. Это в первую очередь сказывается на распределении температуры на ее участках.

Различают сварку на постоянном токе прямой и обратной полярности. Дуга обратной полярности существенно отличается от дуги прямой полярности как по виду (рис. 20), так и по технологическому воздействию.

У торца плавящегося электрода в дуге прямой полярности температура выше температуры плавления металла, при этом перегрев по отношению к температуре плавления на торце электрода может достигать 200–300 °С (температура на торце электрода 1700 °С).

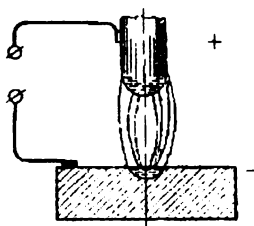


Рис. 20. Схема дуги обратной полярности постоянного тока

Средняя температура металла электродных капель повышается с увеличением тока и его плотности и достигает 2150–2350 °С [18]. Таким образом, в столбе дуги металл перегрет относительно температуры плавления на 500–600 °С. Такую же максимальную температуру имеет металл переднего (головного) участка сварочной ванны, т. е. на аноде температура достигает 2150–2350 °С.

Наибольшее выделение тепла (30–40%) наблюдается в анодной области, наименьшее – в катодной (15–20%), поэтому катод менее нагрет, чем анод. Это объясняется тем, что на катоде идет эндотермический процесс – процесс эмиссии электронов, на который затрачивается значительная доля энергии, на аноде же происходит процесс поглощения электронов, которые возвращают в анод существенную долю энергии в форме тепла.

При сварке на постоянном токе прямой полярности наибольшему тепловому воздействию подвергается сварное изделие. Однако часто такое воздействие технологически неприемлемо. В связи с этим используют дугу обратной полярности, например при сварке закаливающих сталей (в этом случае термический цикл воздействия на изделие будет меньшим, что снизит возможность образования закалочных структур и как следствие – холодных трещин), при сварке тонколистового металла (во избежание прожогов), при наплавке, при сварке в среде углекислого газа, при сварке алюминиевых сплавов. При использовании дуги обратной полярности тепловложение в изделие резко уменьшается, при этом электрод разогрет в большей степени, чем изделие.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему при использовании дуги обратной полярности большему тепловложению подвергается электрод?
2. Поясните, с чем связано использование дуги обратной полярности при сварке алюминиевых сплавов?
3. Почему дугу обратной полярности рекомендуют применять при сварке в среде защитных газов?

8. ОСОБЕННОСТИ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На начальном этапе развития сварочной техники считалось, что устойчивое горение сварочной дуги может быть достигнуто только при питании ее постоянным током. Широкое применение дуговой сварки на переменном токе опровергло это мнение. Однако электрические и тепловые процессы, происходящие в дуге переменного тока, несколько отличаются от процессов, происходящих в дуге постоянного тока, что оказывает заметное влияние на ее устойчивость.

Промышленная частота переменного тока равна 50 Гц, т. е. каждый полупериод электрический ток в сварочном контуре меняет свое направление, а напряжение – полярность (за одну секунду в зоне дуги 100 раз изменяется направление сварочного тока). Катод и анод меняются местами, следовательно, в начале и конце каждого полупериода дуга угасает и температура дугового промежутка снижается. При переплюсовке электродов происходит рекомбинация и деионизация электрических зарядов, так как положительно заряженные ионы изменяют свое направление, они массивны, инертны и встречаются с изменившимися направлением движения электронами. Проводимость дуги в этот момент резко падает.

В условиях пониженной ионизации дугового промежутка и пониженной температуры активных пятен повторное зажигание дуги в начале каждого полупериода обычно происходит только при повышенном напряжении между электродами, именуемом *пиком зажигания дуги* (U_3). Пик зажигания всегда выше напряжения дуги U_d , соответствующего стационарному ее горению (рис. 21).

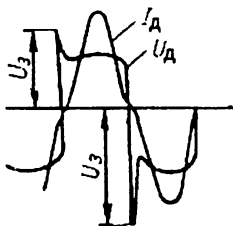


Рис. 21. Осциллограмма тока и напряжения дуги при сварке переменным током:

I_d – ток в дуге; U_d – напряжение дуги; U_3 – напряжение повторного зажигания дуги

Денонизация и охлаждение дугового промежутка с увеличением длины дуги возрастают, что приводит к необходимости дополнительного повышения пика зажигания и к снижению устойчивости дуги. Затухание и обрыв дуги переменного тока происходят при прочих равных условиях при меньшей ее длине по сравнению с дугой постоянного тока.

С увеличением тока физические условия горения дуги улучшаются, что приводит к снижению величины пика зажигания и повышению устойчивости дугового разряда (рис. 22).

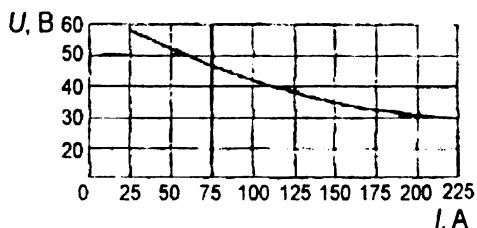


Рис. 22. Зависимость между напряжением зажигания и действующим значением тока (покрытый стальной электрод диаметром 3 мм, напряжение дуги 18 В)

Определенное влияние на величину пика зажигания оказывает эффективный потенциал ионизации, с увеличением которого возрастает и пик зажигания. При наличии в дуговом промежутке достаточного количества паров легко ионизируемых элементов пик зажигания снижается, особенно в том полупериоде, когда катодом является электрод.

Величина пика зажигания оказывает существенное влияние на устойчивость горения дуги переменного тока. Чем хуже условия повторного возбуждения дуги, тем больше разница между пиком зажигания и напряжением дуги. Чем выше пик зажигания, тем выше должно быть напряжение холостого хода источника питания.

При сравнении устойчивости дуги переменного тока и дуги постоянного тока предпочтение чаще отдается дуге постоянного тока. Однако в некоторых случаях переменный ток кроме экономических имеет и технологические преимущества. Основным технологическим преимуществом является практически полное отсутствие магнитного дутья, значительно затрудняющего сварку на постоянном токе более 350–400 А голым и покрытым электродами (при сварке под флюсом магнитное дутье практически не сказывается на устойчивости дуги).

При использовании дуги переменного тока возникает такое явление, как *вентильный эффект*, когда наблюдается асимметрия токов и напряжений в дуге переменного тока в разные полупериоды ее горения. Это чаще всего заметно при сварке неплавящимся электродом, что связано с различными условиями существования дуги на электродах (различие в работах выхода электронов материалов электрода и изделия, различие формы электродов и теплофизических свойств материалов электродов, т. е. температур плавления, теплопроводности). Например, вентильный эффект возникает при сварке вольфрамовым электродом алюминиевого изделия (рис. 23), что обусловлено следующими факторами: 1) различны температуры плавления: $T_{пл W} = 4000 \text{ K}$, а $T_{пл Al} = 950 \text{ K}$; 2) катодное падение напряжения U_k^{Al} существенно больше, чем U_k^W ; 3) теплопровод в массивное алюминиевое тело выше, чем в вольфрамовый стержень.

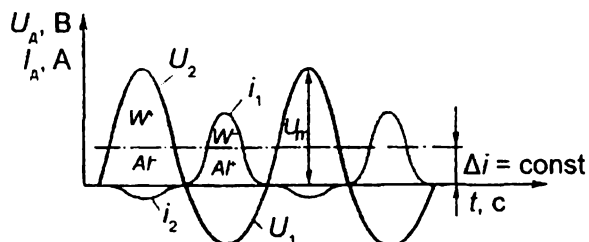


Рис. 23. Асимметрия токов и напряжения в дуге W – Al (вентильный эффект)

Вентильный эффект обычно ухудшает не только стабильность горения дуги, но и формирование шва, прочностные характеристики сварного соединения.

Вопросы для самоконтроля

1. Сравните устойчивость горения дуг переменного тока и постоянного тока.
2. Что называют пиком зажигания дуги? Как эта величина соотносится с напряжением дуги?
3. Влияет ли величина пика зажигания на устойчивость горения дуги переменного тока? Можно ли ее регулировать?
4. Поясните причины возникновения в дуге переменного тока вентильного эффекта.

9. ОСОБЕННОСТИ СВАРОЧНОЙ ДУГИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

При сварке в атмосфере защитных газов электрод, зона дуги и сварочная ванна защищаются струей защитного газа. Он оттесняет атмосферный воздух из зоны сварки. В качестве защитных газов применяются активные газы и их смеси (CO_2 , N_2 , H_2 и др.), а также инертные газы (Ar , He) и смеси ($\text{Ar} + \text{He}$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ и др.).

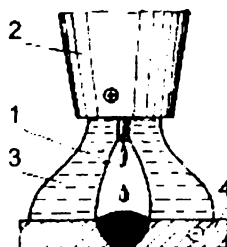


Рис. 24. Схема сварки в среде защитных газов:

1 – сварочная дуга; 2 – сопло; 3 – защитный газ; 4 – основной металл

Любой газ, введенный в зону сварки, кроме оттеснения воздуха из этой зоны может оказывать существенное влияние на все физические и металлургические стороны процесса сварки: горение дугового разряда, плавление основного металла и электродной проволоки, взаимодействие металла с окружающими газами и т. п.

Решающим фактором, определяющим свойства и устойчивость дугового разряда, является температура столба дуги, которая зависит от тока, состава покрытия, защитного газа и других факторов.

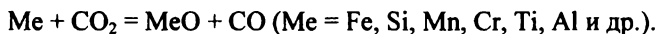
Рассчитанные по формуле В. В. Фролова (3) результирующие потенциалы ионизации дугового газа (7,6–10,3 В) и соответствующие им температуры дуги (6100–8250 К), рассчитанные по формуле К. К. Хренова (4), меньше потенциалов ионизации азота и кислорода воздуха и мало отличаются от потенциалов ионизации железа и его примесей.

Исходя из сказанного, можно полагать, что при сварке металлов плавящимся электродом в атмосфере защитных газов температура дуги слабо зависит от потенциала ионизации защитного газа (за исключением таких газов, как хлор, фтор, кислород и др., ионизация кото-

рых сопровождается образованием электроотрицательных ионов, снижающих устойчивость горения дуги). Влияние потенциала ионизации защитного газа на температуру и устойчивость дуги проявляется лишь в моменты ее зажигания, когда столб дуги содержит мало паров металла, чего не скажешь о сварке металлов неплавящимся электродом в среде инертных газов.

9.1. Сварочная дуга в среде углекислого газа

Применение CO_2 в качестве защитного газа предполагает некоторые металлургические особенности процесса сварки, связанные с окислительным воздействием CO_2 на расплавленный металл.



Кроме того, при высоких температурах сварки идет процесс термической диссоциации углекислого газа с образованием свободного кислорода и угарного газа.

Вдуваемый в зону сварки углекислый газ диссоциирует в области высоких температур с образованием оксида углерода и кислорода.



Зависимость константы равновесия реакции (7) от температуры выражается уравнением

$$\lg K_{(\text{CO}_2)} = \lg \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{CO}_2}} = -\frac{14548}{T} + 4,404,$$

где p_{CO} , p_{O_2} , p_{CO_2} – равновесные парциальные давления соответственно оксида углерода (II), кислорода и углекислого газа.

При температуре 4000 К углекислый газ практически полностью разлагается. Соотношение газов в области сварочной дуги показано на рис. 25.

Как видно из рис. 25, при сварке в углекислом газе парциальное давление кислорода над центром сварочной ванны резко возрастает,

что обуславливает более интенсивное окисление металла в высоко-температурной области зоны сварки (в дуге).

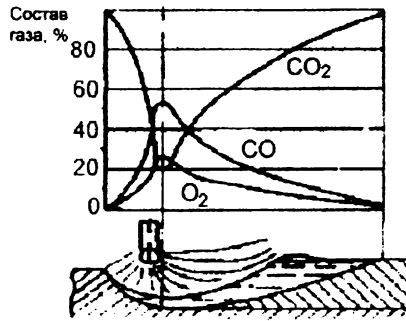


Рис. 25. Ориентировочная схема изменения состава газа при сварке в среде CO_2

Окислительное воздействие CO_2 нейтрализуется введением в сварочную проволоку раскислителей (Mn, Si).

Электрическая дуга в среде CO_2 требует специальных условий для устойчивого горения. Это обусловлено тем, во-первых, углекислый газ охлаждает дугу. С увеличением охлаждения понижается температура и устойчивость горения дугового разряда. Теплота, поглощаемая защитным газом при его поступлении в зону дуги, может складываться из теплоты, идущей на нагрев, диссоциацию и ионизацию газа, а также теплоты химических реакций газа с другими элементами:

$$q = q_{\text{наг}} + q_{\text{диссоц}} + q_{\text{иониз}} + q_{\text{хим.реак}}$$

где q — теплота, поглощаемая защитным газом при его поступлении в зону дуги;

$q_{\text{наг}}$ — теплота, идущая на нагрев газа;

$q_{\text{диссоц}}$ — теплота, идущая на диссоциацию газа;

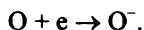
$q_{\text{иониз}}$ — теплота, идущая на ионизацию газа;

$q_{\text{хим.реак}}$ — теплота, выделяемая или поглощаемая в результате химического взаимодействия газа с металлами.

Количество теплоты, расходуемое на нагрев газа, в большей степени зависит от его теплоемкости и теплопроводности.

Всякое дополнительное охлаждение дуги, в частности охлаждение защитным газом, ведет к повышению температуры плазмы (так называемый парадокс Штеенбека). Этот эффект связан с тем, что при охлаждении внешних слоев столба дуги электропроводность этих слоев резко падает и электрический ток начинает протекать в узком канале. При этом в проводнике меньшего сечения выделяется больше тепла и он нагревается до более высокой температуры при прежнем токе.

Во-вторых, продукт диссоциации – кислород – является сильным электроотрицательным элементом, обладает высоким сродством к электрону, следовательно, падает проводимость дуги, так как кислород забирает на себя электроны.



В силу указанных обстоятельств требуется создать более устойчивое горение дуги, что может быть обеспечено применением источника питания повышенного напряжения холостого хода для создания резерва устойчивости дуги либо снижением напряжения зажигания дуги. Если это затруднительно, то сварку в CO_2 следует вести на постоянном токе.

Таким образом, интенсивное охлаждение дуги многоатомными газами (углекислый газ, азот и др.) способствует сжатию плазмы дуги и активных пятен и сопровождается выделением газов из переплавляемого дугой металла, что обуславливает отсутствие струйного переноса металла через дугу. В связи с этим газ CO_2 предварительно подогревается перед применением.

Сварка в углекислом газе чаще производится на постоянном токе обратной полярности. Она отличается от сварки в аргоне менее спокойным горением дуги, более крупным размером капель и наличием динамических сил, противодействующих переходу капли с электрода в сварочную ванну. При сварке в чистом CO_2 сложно обеспечить струйный перенос электродного металла, он не возникает даже при применении очень больших токов порядка 800–1000 А электродами диаметром 2 мм. Некоторые исследователи называют такой перенос металла «анормальным», поскольку в отличие от «нормального» переноса металла в среде аргона он не согласуется с уравнением теплового баланса дуги.

Чаще для сварки углеродистых и низколегированных сталей применяется сварка в смеси углекислого газа с кислородом. Используемые смеси содержат обычно 20–40% O_2 . Добавление кислорода к углекислому газу кроме более энергичного подавления вредного влияния водорода несколько увеличивает глубину проплавления основного металла, улучшает внешний вид и формирование металла шва и уменьшает приваривание к свариваемым деталям и горелке брызг жидкого металла вследствие большого окисления их поверхности. Однако добавление кислорода к углекислому газу вызывает уменьшение содержания элементов-раскислителей и повышение содержания кислорода в металле шва.

Кроме того, введение в зону дуги, горящей в атмосфере CO_2 , добавок кислорода (до 30%) приводит благодаря более интенсивному окислению металла капли к уменьшению его поверхностного натяжения, увеличению частоты переходов и измельчению капель.

Однако считают, что добавление кислорода к углекислому газу незначительно изменяет характер течения процесса и, так же как при сварке в CO_2 , перенос электродного металла происходит в виде крупных капель. Сварку плавящимся электродом в смеси углекислого газа и кислорода рекомендуется вести на удлиненном вылете электродной проволоки. Общие потери на разбрызгивание при защите дуги смесью газов состава 70% CO_2 + 30% O_2 практически одинаковы. Однако в смеси $CO_2 - O_2$ отмечается снижение привариваемости брызг к основному металлу.

При малой длине дуги на низких напряжениях процесс протекает с короткими замыканиями, при этом происходит электрический взрыв переключки между электродом и ванной, вызывающий выброс металла за пределы сварочной ванны – разбрызгивание.

9.2. Сварочная дуга в среде инертных газов

Инертные газы (аргон, гелий) хорошо защищают металл от атмосферного воздуха. Значительные различия в плотности и теплопроводности аргона и гелия определяют особенности их защитных свойств, а также условия горения дуги. Аргон является более тяжелым газом, чем воздух. При истечении из сопла горелки струя аргона лучше, надежнее и продолжительнее защищает расплавленный металл. Гелий защищает металл хуже аргона (его плотность меньше плотности аргона), что приводит к необходимости увеличения его расхода для надежной защиты.

Инертные газы являются трудноионизируемыми газами, потенциалы ионизации аргона и гелия соответственно равны 15,7 и 24,5 эВ. Это означает, что при использовании инертных газов будут наблюдаться трудности зажигания дуги. Поэтому процесс зажигания дуги инициируют использованием источника питания с повышенным напряжением холостого хода (70–80 В) либо импульсного источника тока, в котором на момент зажигания дуги создается кратковременный импульс.

При сварке в гелии при неизменной силе тока напряжение на дуге существенно выше, чем при сварке в аргоне, что связано с более высоким потенциалом ионизации гелия (рис. 26).

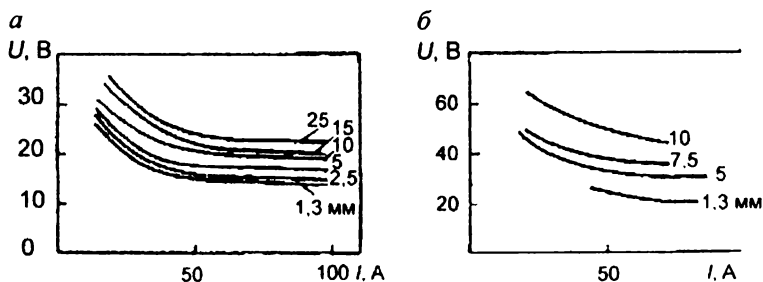


Рис. 26. Вольт-амперные характеристики дуг с неплавящимся электродом различной длины:

a – в аргоне; *b* – в гелии

Дуга в гелии имеет равномерную проплавляющую способность и менее концентрирована, она создает более равномерную форму проплавления, чем дуга в аргоне, которая характеризуется большей глубиной проплавления в центре (рис. 27).

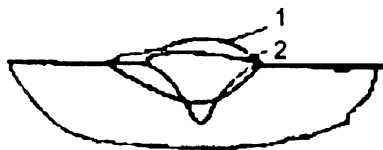


Рис. 27. Схема форм проплавления металла при сварке в среде инертных газов:

1 – в аргоне; *2* – в гелии

Чаще при сварке рекомендуют использовать смесь газов (65% аргона и 35% гелия), что наиболее полно обеспечивает преимущества обоих газов – более глубокое проплавление основного металла и хорошее формирование металла шва.

Практика показала, что использование чистых инертных газов создает трудности в плавлении и переносе электродного металла. Инертные газы не способствуют снижению поверхностного натяжения металла, поэтому для облегчения каплеобразования в них вводят добавки кислорода от 5 до 15%.

Переход от капельного переноса металла к струйному зависит и от величины силы сварочного тока. Величина силы сварочного тока, при которой наблюдается резкий переход к струйному переносу, называется критической (для сварки в инертных газах – 300–400 А).

Сварку в среде инертных газов используют при изготовлении ответственных конструкций и изделий из активных металлов (алюминия, титана, ниобия, циркония и их сплавов).

При сварке плавящимся электродом в инертных газах в качестве защитного газа обычно используют чистый аргон. При сварке толстостенных конструкций из алюминиевых и титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей для улучшения проплавления и формирования шва иногда используют смеси 50% Ar и 50% He, 40% Ar и 60% He. Сварка в чистом гелии применяется редко.

Основные закономерности процесса сварки в смесях Ar – O₂, Ar – CO₂, Ar – CO₂ – O₂ мало отличаются от существующих при сварке в чистом Ar. Однако благодаря добавке окислительных газов (1–5% O₂ или 5–25% CO₂) обеспечивается существенное снижение поверхностного натяжения жидкого металла расплавляемой электродной проволоки, уменьшение размеров образующихся и отрывающихся от электрода капель и снижение критического тока перехода от крупнокапельного переноса металла к струйному. Диапазон токов при стабильном ведении процесса сварки расширяется. Обеспечиваются лучшее формирование металла шва и меньшее разбрызгивание, лучшая форма провара и меньшее излучение дуги по сравнению со сваркой в чистом аргоне, а также в чистом углекислом газе. Благодаря перечисленным преимуществам сварка плавящимся электродом в смесях Ar – O₂, Ar – CO₂, Ar – CO₂ – O₂ (15–20% CO₂ и 3–5% O₂) широко применяется на практике. При содержании CO₂, начиная с 40–50%, свар-

ка в смеси Ar – CO₂ мало отличается по электрофизическим характеристикам от сварки в чистом CO₂.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему углекислый газ называют активным защитным газом?
2. Устойчиво ли горит сварочная дуга в среде углекислого газа?
3. Почему затруднен процесс зажигания дуги в среде инертных газов?
4. Приведите возможные причины появления разбрызгивания при сварке дугой в среде углекислого газа.
5. Почему рекомендуется вести сварку в среде защитных газов на обратной полярности?
6. Чем обусловлено применение смеси защитных инертных газов?
7. С какой целью в защитный газ аргон добавляют 5–10% кислорода?
8. С чем связана разница в напряжениях сварочных дуг в среде аргона и в среде гелия?

10. СВАРОЧНАЯ ДУГА ПОД ФЛЮСОМ

При сварке под флюсом (рис. 28) электрическая дуга возбуждается и горит под слоем достаточно тугоплавких и трудноиспаряемых веществ специального состава, называемых сварочными флюсами. В области горения дуги образуется полость, ограниченная в верхней части оболочкой расплавленного флюса. Эта газовая полость заполнена парами электродного металла и компонентов флюса, их давление поддерживает свод, образующийся над сварочной ванной. Дуга горит в непосредственной близости от переднего края ванны, несколько отклоняясь от вертикального положения в сторону, обратную направлению сварки. Под влиянием давления дуги жидкий металл также оттесняется в сторону, противоположную направлению сварки, образуя сварочную ванну. Под электродом создается кратер с тонким слоем расплавленного металла, а основная масса расплавленного металла занимает пространство от кратера до поверхности шва. Расплавленный флюс вследствие значительно меньшей плотности всплывает на поверхность расплавленного металла шва и покрывает его плотным слоем. Флюс защищает дугу и сварочную ванну от вредного влияния окружающей среды, оказывает металлургическое воздействие на металл сварочной ванны, а также препятствует разбрызгиванию жидкого металла.

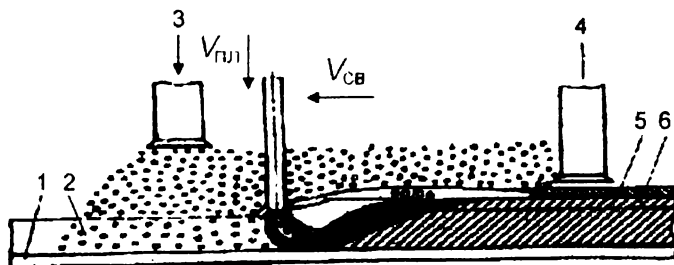


Рис. 28. Схема процесса автоматической сварки под флюсом:
1 – свариваемый металл; 2 – сварочный флюс; 3 – механизм подачи флюса;
4 – флюсосборник; 5 – закристаллизовавшийся металл сварного соединения;
6 – шлаковая корка

Кроме того, обладая низкой теплопроводностью, флюс замедляет процесс охлаждения металла шва, что облегчает выход растворенных в металле газов и шлаковых включений на поверхность ванны, способствует очищению металла от загрязнений.

Таким образом, флюс надежно защищает сварочную дугу и плавильное пространство от кислорода и азота атмосферного воздуха, благоприятствует течению металлургических реакций между металлом и шлаком, способствует улучшению сварочно-технологических свойств процесса: повышению устойчивости горения дуги, увеличению глубины проплавления, плотности тока, возрастанию производительности сварки. Все это выдвигает сварку под флюсом на одно из первых мест в области электродуговой сварки.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы преимущества сварочной дуги под флюсом?
2. Каким образом флюс влияет на устойчивость горения дуги?
3. Будет ли высокая электропроводность флюса повышать устойчивость горения дуги?

11. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРОЧНАЯ ДУГА (СЖАТАЯ ДУГА)

Для сварки и главным образом резки металлов широкое распространение получил плазменно-дуговой разряд, ограниченный или сжатый специальными соплами.

Плазменную струю получают при помощи сравнительно несложных приемов, используя воздействие магнитных полей, продувание струи газа и пропускание дуги через обжимающее сопло. Таким образом удлиняют столб дуги до десятков и даже сотен миллиметров, одновременно уменьшая его диаметр, и получают хорошо сформированную длинную струю плазмы. Плазменная дуга благодаря обжатю ее в канале сопла газовым потоком превращается в концентрированный источник тепла и характеризуется высокими температурами столба (15000–25000 К) и высокими скоростями плазмы.

Получают плазменную дугу в специальных плазменных горелках (плазмотронах), в которых обычно используют неплавящийся вольфрамовый катод или медный катод, изолированный от канала и сопла головки (рис. 29).

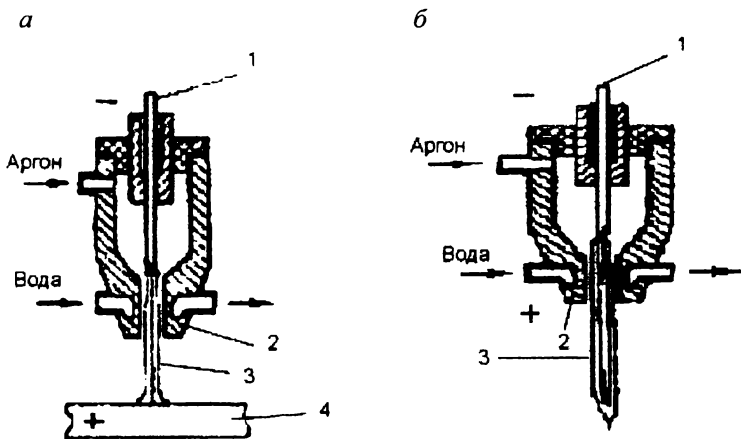


Рис. 29. Устройства для получения сжатых дуг

В устройстве, показанном на рис. 29, а, дуговой разряд существует между вольфрамовым электродом 1 и изделием (анодом) 4. Его ради-

альные размеры в значительной мере определяются диаметром отверстия в охлаждаемом водой сопле 2. Для защиты катода от разрушения, а сопла от интенсивного нагрева и оплавления дугой через него продувается инертный газ, чаще всего аргон. Сжатие столба дуги 3 в области сопла ведет к уменьшению площади анодного пятна и его блужданию, следствием чего является концентрация энергии на аноде и повышение интенсивности его плавления. Струя газа, истекающая из сопла, повышает также давление на жидкий металл ванны и вызывает увеличение глубины проплавления анода. При некоторых критических скоростях струи жидкий металл ванны выдувается из зоны нагрева и сварка становится невозможной. Зато интенсивно происходит процесс разделительной резки металла, имеющий важное значение в промышленности.

В устройстве, изображенном на рис. 29, б, дуга возбуждается между катодом 1 и соплом-анодом 2. Под действием струи аргона, вытекающей из сопла, часть плазмы столба 3 выносятся за его пределы. Энергия этой плазмы, складывающаяся из кинетической и потенциальной энергии ее частиц, используется для нагрева и плавления обрабатываемых изделий. В большинстве случаев она невелика, поэтому используется чаще всего для сварки тонких изделий, легкоплавких металлов и пластмасс или для пайки.

Условия существования столба различны по его длине. В области сопла он сжат, однако вне его пределов он может расширяться до размеров свободного столба. Как показывают исследования [10], такое расширение имеет место, но происходит постепенно по мере удаления от сопла и тем интенсивнее, чем сильнее сжат разряд и чем меньше скорость истекающего из сопла газа.

Температура столба сжатой дуги определяется прежде всего потенциалом ионизации дугового газа, она растет по мере уменьшения радиуса сопла и увеличения силы тока, что выражается уравнением

$$T = 1040U_{\text{ион}} + 37 \frac{I_{\text{д}}^{19}}{r_{\text{с}}^{19}}, \quad (8)$$

где T – температура столба сжатой дуги;
 $U_{\text{ион}}$ – потенциал ионизации дугового газа;
 $r_{\text{с}}$ – радиус сопла;
 $I_{\text{д}}$ – сварочный ток.

Напряженность поля E также связана с температурой сжатой дуги.

$$E = 35 \cdot 10^{-8} \frac{r_c}{I_d} T^4. \quad (9)$$

Подстановка в уравнение (9) значения температуры из выражения (8) дает

$$E = 35 \cdot 10^{-8} \frac{r_c}{I_d} \left(1040U_{\text{ион}} + 37 \frac{I_d^{\frac{8}{12}}}{r_c^{\frac{19}{12}}} \right)^4.$$

Напряженность поля также повышается по мере увеличения силы тока и уменьшения радиуса сопла.

Радиальное распределение температуры столба сжатой дуги, определенное спектроскопическим методом, приведено на рис. 30.

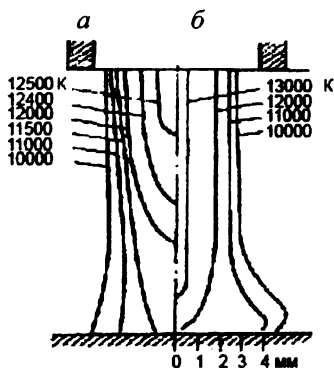


Рис. 30. Температурное поле столба сжатой дуги в аргоне при расходе 5 л/мин (а) и 20 л/мин (б) при силе тока 110 А и расстоянии от сопла до анода 15 мм

Падение температуры на краях токопроводящего канала более резкое, чем в свободной дуге, горящей в аргоне. В приосевой же части сжатого столба эти величины меняются медленнее. При большой скорости истечения аргона (20 л/мин) изотермы являются практически цилиндрическими на всем протяжении столба. Его температура

близка к величине $T = 800U_i = 12600$ К, соответствующей потенциалу ионизации аргона $U_i = 15,4$ эВ.

В качестве плазмообразующего материала для сжатой дуги обычно применяют такие газы, как аргон, гелий, азот, водород, воздух и их смеси, а также воду.

Газы в плазмотроне должны выполнять следующие функции:

- защищать от окисления и охлаждать вольфрамовый электрод и сопло;

- обеспечивать получение стабилизированной плазменной струи;
- обеспечивать наилучшую теплопередачу к изделию.

Иногда их разделяют на плазмообразующие и защитные и подают раздельно: в зону катода – плазмообразующий газ, а в зону столба дуги – защитный. Для защиты катода и сопла от разрушения и перегрева наилучшим газом является аргон, так как он химически инертен и имеет малую теплопроводность. Однако для плазмообразования он менее подходит, что обусловлено низкими качествами аргоновой плазмы (низкой энтальпией – теплосодержанием, малой напряженностью поля дугового столба в аргоне). Более подходящим газом для стабилизации дуги является азот. Однако в азоте и в воздухе вольфрамовый электрод разрушается интенсивнее, в то время как в гелии и аргоне он значительно более стоек. Поэтому чаще применяют аргон в смеси с газами.

Плазменную дугу используют для резки, сварки, наплавки и напыления.

Вопросы для самоконтроля

1. Каким образом получают сжатую дугу?
2. Как сжатие дуги влияет на ее свойства?
3. Поясните функции используемых инертных газов при получении плазменно-сжатого дугового разряда.
4. Чем отличаются устройства плазмотронов (см. рис. 29, а и б)?
5. От каких факторов зависит температура сжатой дуги?

Заключение

Учебное пособие «Физико-химические процессы в сварочной дуге» предназначено для использования при изучении специальной дисциплины «Теория сварочных процессов» в ходе подготовки будущих педагогов профессионального обучения специализации «Технологии и технологический менеджмент в сварочном производстве». Изучение дисциплины «Теория сварочных процессов» формирует систему теоретических знаний в области основ проектирования технологии сборки и сварки сварных металлоконструкций, выбора оптимальных технологических решений относительно способов сварки, конструкционных и сварочных материалов, предупреждения дефектов и обоснования качества сварных соединений. При этом приобретаются и закрепляются специальные умения, связанные с учебной производственно-технологической деятельностью в сварочном производстве.

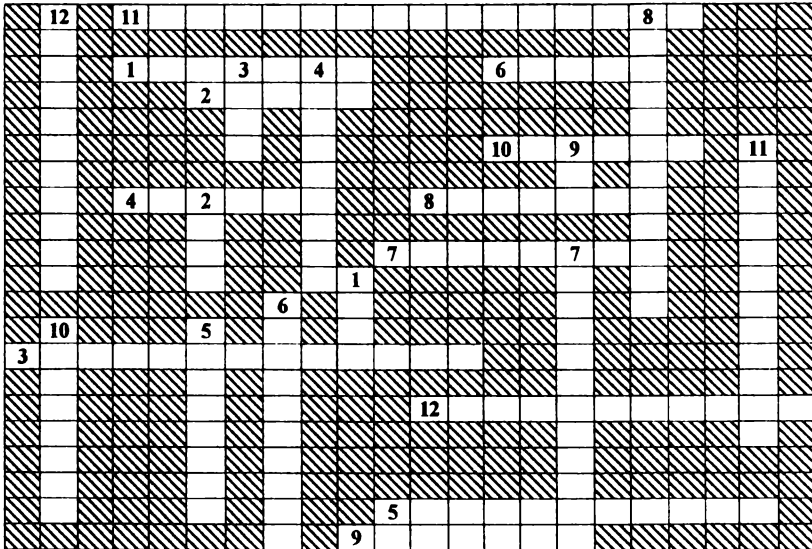
Учебный материал, представленный в данном пособии и отражающий основные процессы, которые происходят в широко используемом в сварочном производстве источнике энергии – электрической дуге, будет востребован при изучении таких дисциплин специализации, как «Источники питания для сварки», «Оборудование отрасли», «Автоматическое управление сварочной техникой», «Механизация и автоматизация сварочного производства». Знание особенностей разновидностей сварочных дуг необходимо при выборе способа электродуговой сварки, что в дальнейшем отразится на выборе технологии сварки, возможности получения качественного сварного соединения, оптимальном выборе сварочного и сборочного оборудования, рациональных технико-экономических показателей производства сварки.

Библиографический список

1. *Акулов А. И.* Технология и оборудование сварки плавлением [Текст]: учеб. для студентов вузов / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. М.: Машиностроение, 1997. 432 с.
2. *Алов А. А.* Основы теории процессов сварки и пайки [Текст] / А. А. Алов. М.: Машиностроение, 1964. 272 с.
3. *Багрянский К. В.* Теория сварочных процессов [Текст] / К. В. Багрянский, З. А. Добротина, К. К. Хренов. Киев: Выща шк., 1976. 423 с.
4. *Волченко В. Н.* Теория сварочных процессов [Текст]: учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология свароч. пр-ва» / В. Н. Волченко; под ред. В. В. Фролова. М.: Высш. шк., 1988. 559 с.
5. *Гвоздецкий В. С.* Расчет степени ионизации многокомпонентной плазмы столба сварочной дуги [Текст] / В. С. Гвоздецкий, И. Н. Рублевский // Автомат. сварка. 1977. № 11. С. 12–16.
6. *Гвоздецкий В. С.* Расчет электропроводности многокомпонентной плазмы [Текст] / В. С. Гвоздецкий, И. Н. Рублевский // Автомат. сварка. 1980. № 8. С. 21–22.
7. *Глизманенко Д. Л.* Сварка и резка металлов [Текст]: учеб. для проф.-техн. училищ / Д. Л. Глизманенко. М.: Высш. шк., 1975. 478 с.
8. *Думов С. И.* Технология электрической сварки плавлением [Текст]: учеб. для машиностроит. техникумов / С. И. Думов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. 368 с.
9. *Дюргеров Н. Г.* Уменьшение разбрызгивания металла и стабилизация процесса сварки короткой дугой [Текст] / Н. Г. Дюргеров // Автомат. сварка. 1972. № 6. С. 48–50.
10. *Ленивкин В. А.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах [Текст] / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
11. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г. И. Лесков. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
12. *Мазель А. Г.* Эмиссионные свойства сварочных материалов при дуговой сварке [Текст] / А. Г. Мазель, В. М. Пумпурс // Автомат. сварка. 1983. № 12. С. 30–32.
13. *Мечев В. С.* Электромагнитные силы в сварочной дуге [Текст] / В. С. Мечев, В. С. Слободянюк, М. А. Самсонов // Автомат. сварка. 1980. № 8. С. 17–20.

14. *Новожилов Н. М.* Сварка плавящимся электродом в углекислом газе [Текст] / Н. М. Новожилов, В. Н. Суслов. М.: Машгиз, 1958. 191 с.
15. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом [Текст] / А. Г. Потапьевский М.: Машиностроение, 1974. 240 с.
16. *Потапьевский А. Г.* Сварка в углекислом газе [Текст] / А. Г. Потапьевский. М.: Машиностроение, 1984. 80 с.
17. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением [Текст] / под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 668 с.
18. *Хренов К. К.* Электрическая сварочная дуга [Текст] / К. К. Хренов. М.: Машгиз, 1949. 162 с.
19. *Шафранский Л. Г.* Оценка устойчивости дуги переменного тока [Текст] / Л. Г. Шафранский, Л. Н. Орлов, А. В. Абрашин // Автомат. сварка. 1972. № 4. С. 18–20.
20. *Яценко С. И.* Управление дугой, движущейся в узком зазоре под действием магнитного поля, при прессовой сварке труб [Текст] / С. И. Яценко, П. В. Кузнецов, В. Ю. Игнатенко // Автомат. сварка. 1987. № 10. С. 27–31.

**Кроссворд по теме
«Физико-химические процессы в сварочной дуге»**



По горизонтали: 1. Процесс испускания электронов с поверхности конденсированных веществ. 2. Отрицательно заряженный электрод. 3. Зависимость напряжения дуги от величины тока. 4. Состояние столба дуги. 5. Процесс, противоположный процессу ионизации. 6. Область, находящаяся между анодной и катодной областями дуги. 7. Элементарная отрицательно заряженная частица. 8. Вольт-амперная характеристика дуги в области средних значений токов. 9. Механизм ионизации. 10. Положительно заряженный ион. 11. Механизм эмиссии. 12. Механизм ионизации, осуществляющийся за счет упругого соударения частиц.

По вертикали: 1. Изобретатель электрической дуги. 2. Положительно заряженный электрод. 3. Фамилия ученого, сформулировавшего уравнение, благодаря которому возможен расчет степени термической ионизации равновесной плазмы. 4. Процесс превращения газовых молекул и атомов в заряженные частицы. 5. Вольт-амперная ха-

рактеристика дуги в области малых значений токов. 6. Параметр сварочной дуги. 7. Процесс перехода частицы из возбужденного состояния в невозбужденное. 8. Вид диффузии заряженных частиц, имеющий место в сварочной дуге. 9. Направленное движение электрически заряженных частиц. 10. Прибор, который создает продольное магнитное поле вокруг сварочной дуги. 11. Вольт-амперная характеристика дуги в области высоких значений токов. 12. Механизм ионизации, имеющий место в сварочной дуге.

Контрольные тесты по теме «Сварочная дуга»

Тест 1

В заданиях 1–3 выберите номер правильного варианта ответа.

1. Ионизации газовых молекул и атомов за счет облучения отвечает условие:

1) $\frac{3}{2} kT \geq eE_{\text{ион}}$;

2) $h\nu \geq eE_{\text{ион}}$;

3) $mv^2 \geq eE_{\text{ион}}$.

2. Эмиссия электронов – это процесс:

1) диссоциации молекул на атомы;

2) распада атомов, молекул с образованием ионов и электронов;

3) выхода электронов с поверхности конденсированных веществ.

3. В анодной области дуги в основном происходят процессы:

1) ионизации молекул и атомов;

2) деионизации;

3) рекомбинации;

4) эмиссии электронов;

5) перехода электронов из объема дуги в материал изделия.

В заданиях 4–5 выберите номера правильных вариантов ответов.

4. В период формирования капли электродного металла (сварка в потолочном положении) на нее действуют силы, способствующие ее отрыву от торца электрода:

1) сила тяжести;

2) сила поверхностного натяжения;

3) электродинамические силы (пинч-эффект);

4) реактивные силы;

5) плазменные потоки;

6) сила вязкого течения.

5. Влияние магнитного поля дуги можно регулировать:

1) меняя угол наклона электрода к поверхности изделия;

- 2) регулируя ток дуги;
- 3) меняя место подвода тока;
- 4) используя дугу на постоянном токе прямой полярности;
- 5) используя дугу переменного тока;
- 6) меняя местоположение ферромагнитных масс.

В заданиях 6–7 дополните предложение

6. Процесс эмиссии характеризуется _____, который измеряется _____. Большой эмиссионной способностью обладают _____.

7. При осуществлении наплавки рекомендуют использовать дугу _____, так как (поясните выбор) _____.

Тест 2

В заданиях 1–5 выберите номера правильных вариантов ответов.

1. При малых токах (до 100 А) вольт-амперная характеристика дуги:

- 1) возрастающая;
- 2) пологая;
- 3) падающая.

2. Это связано:

- 1) с возрастанием сопротивления столба дуги;
- 2) с уменьшением сопротивления столба дуги;
- 3) с увеличением длины дуги.

3. В период формирования капли электродного металла (сварка в нижнем положении) на нее действуют силы, препятствующие ее отрыву от торца электрода:

- 1) сила тяжести;
- 2) сила поверхностного натяжения;
- 3) электродинамические силы (пинч-эффект);
- 4) реактивные силы;
- 5) плазменные потоки.

4. Температура дуги в катодной области:

- 1) наибольшая;
- 2) средняя;
- 3) наименьшая.

5. Это обусловлено процессами:

- 1) прохождения электрического тока;
- 2) эмиссии электронов;
- 3) ионизации газовых молекул и атомов;
- 4) рекомбинации в дуге.

В заданиях 6–7 выберите номер правильного варианта ответа.

6. Сварочная дуга пространственно состоит из последовательно расположенных:

- 1) катода, столба дуги, анода.
- 2) катодной области, столба дуги, анодной области.
- 3) столба дуги, катодной области, анодной области.

7. Термическому механизму ионизации газа отвечает условие:

1) $\frac{3}{2} kT \geq eE_{\text{ион}}$;

2) $h\nu \geq eE_{\text{ион}}$;

3) $mv^2 \geq eE_{\text{ион}}$.

В заданиях 8–9 дополните предложение.

8. Вентильный эффект дуги переменного тока – _____.

9. Причинами возникновения вентильного эффекта могут быть _____.

**Тематика индивидуальных заданий
для самостоятельной работы студентов**

1. Электропроводность многокомпонентной плазмы дуги.
2. Электромагнитные силы в сварочной дуге.
3. Особенности управления сварочной дугой под действием магнитного поля.
4. Распределение температуры в сварочной дуге.
5. Оценка устойчивости дуги переменного тока.
6. Эмиссионные свойства сварочных материалов при дуговой сварке.
7. Факторы, влияющие на устойчивость дуги.
8. Влияние характера переноса на стабильность горения дуги.
9. Особенности воздействия внешних магнитных полей на сварочную дугу.
10. Неоднородность электрических свойств дуги.
11. Воздействие защитных газов на сварочный дуговой разряд.
12. Технологические свойства сварочной дуги.

Учебное издание

Федулова Марина Александровна

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ**

Учебное пособие

Редактор Е. А. Ушакова
Компьютерная верстка О. Н. Казанцевой

Печатается по постановлению
редакционно-издательского совета университета

Подписано в печать 02.06.09. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов. Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 150 экз. Заказ № 271
Издательство ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет». Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

**Отпечатано ИП Горонков А.В.
Свердловская обл.,
г. Верхняя Пышма, ул. Феофанова, 4**

