АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА

МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Процессы в дуге и плавление электродов

Под редакцией
академика АН УССР
И. К. ПОХОДНИ

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1990

Авторы:
И. К. ПОХОДНЯ, В. Н. ГОРПЕНЮК, С. С МИЛИЧЕНКО, В. Е. ПОНОМАРЕВ, Л. В. СТАРОДУБЦЕВ, В. И. ШВАЧКО, И. Р. ЯВДОЩИН

УДК 621.791.01.669 + 621.791.75.042

Металлургия дуговой сварки : Процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др.; Под ред. И. К. Походни; АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона.— Киев : Наук. думка, 1990.— 224 с.— ISBN 5-12-009385-X;
ISBN 5-12-009386-8

В монографии рассмотрены характеристики сварочных дуг, термоэмиссионные свойства покрытий и шлаков сварочных электродов, особенности плавления и переноса электродного металла в зависимости от состава покрытий, параметров режима сварки. Описаны методы, аппаратура и критерии оценки переноса электродного металла и стабильности дуги переменного тока. Приведены данные о взаимосвязи стабильности дуги и переноса металла с составами шлаковых систем и электрофизическими характеристиками дуг. Большое внимание уделено получению статистически достоверной информации путем обработки большого массива данных на ЭВМ. Предложены пути повышения стабильности дуг и улучшения переноса металла при сварке покрытыми электродами.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами металлургии дуговой сварки и разработки сварочных материалов.

Ил. 213. Табл. 73. Библиогр.: с. 211—220 (322 назв.).

Утверждено к печати ученым советом Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР

Редакция технической литературы

Редактор *З. Л. Кобка*

м $\frac{2704060000\text{-}122}{\text{М221(04)-90}}$ БЗ-10-6-90

ISBN 5-12-009385-X
ISBN 5-12-009386-8

© Институт электросварки им. Е. О. Патона АН УССР, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание новых конструкционных материалов и методов их соединения является одним из приоритетных направлений развития науки и техники. Оно во многом предопределяет прогресс машиностроения и строительной индустрии. Основным методом соединения металлических материалов до конца нынешнего века несомненно останется дуговая сварка, которая непрерывно развивается и совершенствуется. Расширяются области применения сварных конструкций, усложняются условия их эксплуатации. Все более жесткие требования предъявляются к качеству сварных соединений, экономичности и безопасности сварочных технологий. В связи с этим необходимо углубление знаний в области теоретических основ дуговой сварки.

Процессы в сварочной дуге — термоэлектронная и термоионная эмиссия, термическая и поверхностная ионизация, контрагирование столба дугового разряда и приэлектродных областей и др. в значительной мере определяют такие важнейшие технологические характеристики, как стабильность дуги, плавление, перенос и разбрызгивание электродного металла, диапазон режимов сварки и другие характеристики, тесно связанные с производительностью сварочного процесса и его гигиеническими характеристиками.

Качество сварного соединения определяется элементным составом и структурой сварного шва, содержанием в нем газов (водорода, азота) и неметаллических включений, особенностями диффузионных и ликвационных процессов в сварочной ванне и образованием химической и структурной неоднородности. Знание особенностей кристаллизации сварочной ванны, формирования структуры шва, механизмов образования дефектов — пор и кристаллизационных трещин в сварных швах могут быть использованы для совершенствования металлургических и технологических путей повышения стойкости металла шва к образованию пористости и кристаллизационных трещин, для разработки рекомендаций по увеличению хладостойкости сварных швов, сопротивляемости их хрупкому разрушению.

Результаты исследований проблем металлургии дуговой сварки, выполненных авторами в Институте электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона АН УССР, послужили основой для создания данной монографии.

В настоящей книге обобщены литературные данные об особенностях сварочных дуг, приведены результаты исследований процессов, происходящих в межэлектродном промежутке, в приэлектродных областях и на поверхности капли и сварочной ванны. Рассмотрены методы и критерии оценки стабильности сварочных дуг переменного и постоянного тока, а также переноса электродного металла. Изучена взаимосвязь эмиссионных свойств покрытий и шлаков, состава и конструкции электрода со стабильностью горения дуги. Обобщены результаты исследований физико-химических процессов при нагреве, плавлении и испарении электродов, флюсов, шлаков, механизмов образования сварочных аэрозолей. Рассмотрена взаимосвязь стабильности дуги, переноса металла, условий начального зажигания дуги с характеристиками источников питания.

Установленные в работе закономерности могут быть использованы для создания новых сварочных материалов, совершенствования технологии дуговой сварки, а также источников питания.

Предисловие и заключение написал И. К. Походня; главу I—И. К. Походня, Л. В. Стародубцев и В. И. Швачко; главу II — И. К. Походня, В. Н. Горпенюк и Л. В. Стародубцев; главу III — И. К. Походня, И. Р. Явдощин, С. С. Миличенко и В. Н. Горпенюк; главу IV — И. К. Походня, С. С. Миличенко и В. Н. Горпенюк; главу V — В. Е. Пономарев.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$B_з$ — показатель стабильности горения дуги переменного тока

C — электрическая емкость

c_p — удельная теплоемкость расплавленного металла

$d_к$ — диаметр капли электродного металла

$d_э$ — диаметр стержня электрода

E — напряженность электрического поля

E_s — сродство к электрону

e — заряд электрона

f — частота тока

$f_к$ — частота перехода капель электродного металла

$f_{к.з}$ — частота коротких замыканий

g — ускорение силы тяжести

h — постоянная Планка

I — электрический ток

$I_{св}$ — ток сварки

j — плотность электрического тока

k — постоянная Больцмана

$K_{м.п}$ — коэффициент массы покрытия

$l_д$ — длина дуги

$l_э$ — длина электродного стержня

$N_к$ — число переходов капель электродного металла за определенный период времени сварки

$N_{к.з}$ — число коротких замыканий за определенный период времени

n — концентрация времени сварки

$S_{вн}$ — площадь поперечного сечения внутреннего слоя покрытия двухслойной конструкции

$S_{нар}$ — площадь поперечного сечения наружного слоя покрытия двухслойной конструкции

$S_п$ — отношение площадей $S_{вн}$ и $S_{нар}$

$t_{к.з}$ — длительность интервалов между короткими замыканиями

$t_{св}$ — время сварки (время горения дуги)

$U_д$ — напряжение дуги

$U_з$ — напряжение повторного зажигания дуги переменного тока

$U_{х.х}$ — напряжение холостого хода источника питания

$U_{х.х}^{мин}$ — минимальное напряжение холостого хода сварочного трансформатора, на котором дуга горит еще без обрывов

U_i — потенциал ионизации атомов

$v_{ст}$ — массовая скорость плавления электродного стержня

$v_{пл}$ — линейная скорость плавления электрода

α — степень ионизации

λ — коэффициент теплопроводности

μ — магнитная проницаемость

ν' — скорость взаимодействия

ξ — окислительная способность смеси

$\tau_к$ — время между переходами капель электродного металла

$\tau_{к.з}$ — длительность короткого замыкания

φ — работа выхода

ω — угловая частота

Глава первая

ОСОБЕННОСТИ СВАРОЧНЫХ ДУГ

1. Характеристики сварочных дуг

Согласно классификации, предложенной в работе [38], электрическая дуга как физический процесс протекания тока в газе относится к типу самостоятельных установившихся разрядов, у которых поле искажено объемными зарядами. Из всего многообразия электрических дуг можно выделить дугу высокого давления, важная характеристика которой — квазиизотермичность положительного столба. К этому типу дуг относится сварочная дуга, обладающая рядом отличительных особенностей. Это короткая дуга, у которой длина разрядного промежутка и поперечные размеры столба — величины одного порядка, обычно измеряемые несколькими миллиметрами. Величина тока в большинстве случаев равна нескольким сотням ампер и достигает иногда 1500—2000 А и более. Напряжение сварочной дуги вследствие малой ее длины и большого тока изменяется обычно в пределах 20—45 В. В пространстве между электродами, имеющем объем всего в несколько десятых долей кубического сантиметра, происходит преобразование в тепло электрической энергии мощностью 2—30 кВт [198], в результате чего электроды сильно нагреваются, плавятся и испаряются. При этом в дуге, помимо потоков плазмы и пара, присутствуют потоки капель расплава электродов.

Электрическая сварочная дуга, как и другие виды самостоятельных установившихся разрядов, характеризуется резко неравномерным распределением потенциала между электродами. У них есть области скачков потенциала, обусловленные нескомпенсированным пространственным зарядом (рис. 1). У катода эта область образуется электронами эмиссии и приходящими со столба положительными ионами. У анода скачок потенциала связан с избытком электронов, так как положительные ионы отталкиваются полем анода и не попадают непосредственно на его поверхность. Необходимо отметить, что эта упрощенная схема не отражает многообразия процессов, происходящих вблизи электродов, однако может облегчить их рассмотрение.

В соответствии с распределением потенциала в дуге различают три области: катодную, анодную и столб дуги. Наиболее полно разработана теория столба электрической дуги. Плазма столба квазиизотермична, т. е. в каждой малой области температура всех компонент плазмы почти одинакова. Внутри таких областей распределение частиц по скоростям максвелловское, распределение возбужденных частиц больцмановское, а ионизационное равновесие определяется уравнением Саха [38]. На основе этих представлений для сварочных дуг получены следующие уравнения:

1. Уравнение Саха для определения степени ионизации газа в столбе, уточненное К. К. Хреновым [210, 211],

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} P = 3{,}2 \cdot 10^{-2} a^2 T^{5/2} \exp(-U_i/kT), \quad (1.1)$$

где a^2 — отношение статистических весов иона g_i и нейтрального атома g_0, $a^2 = 2g_i/g_0$. Значение a^2 для различных элементов вычислено К. К. Хреновым. Для железа $a^2 = 12/5$, для элементов

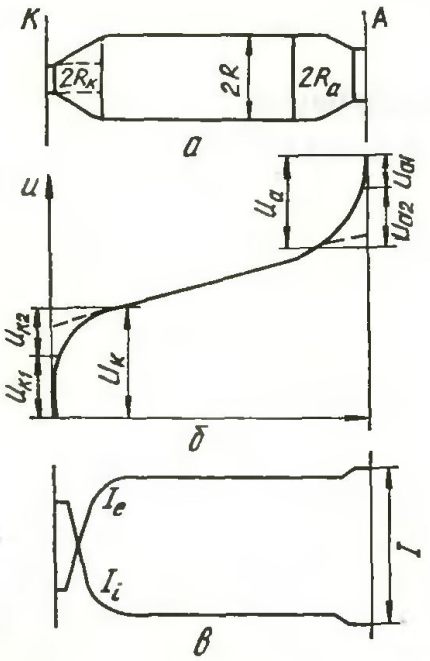


Рис. 1. Распределение вдоль аксиально-симметричной дуги:

а — диаметра дуги; *б* — потенциала; *в* — токов ионов и электронов; $U_{к1}$, U_{a1} и $U_{к2}$, U_{a2} — падения потенциалов в областях пространственного заряда и контракции у катода и анода; $U_к$ и U_a — полные падения потенциалов вблизи электродов [38].

первой группы периодической системы Менделеева $a^2 = 1$, для элементов второй группы $a^2 = 4$.

При малых степенях ионизации, характерных для сварочных дуг ($\alpha \ll 1$), уравнение (1.1) упрощено Г. И. Лесковым [97]:

$$\alpha = 0{,}18aP^{-1/2}T^{5/4}\exp(-U_i/2kT). \quad (1.2)$$

2. Предложенное К. К. Хреновым уравнение, связывающее эффективный потенциал ионизации с температурой столба дуги [209]

$$T = 800U_{i\text{эф}}. \quad (1.3)$$

3. Уравнение для вычисления $U_{i\text{эф}}$ дугового газа, когда последний представляет собой смесь из n компонентов [188, 204],

$$U_{i\text{эф}} = -\frac{T}{5800}\ln\sum_n\left(\frac{N_i}{N}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right). \quad (1.4)$$

С помощью уравнений (1.1—1.4) объясняются действия ионизирующих обмазок и флюсов при металлических электродах [209] и паров металлических электродов в дугах, горящих в инертных газах [189, 97].

Г. И. Лесков доработал и уточнил уравнения столба дуги на основе каналовой модели, в которой столб схематизируется цилиндрическим каналом с условным радиусом $r_{\text{эф}}$ [97]. В пределах этого канала температура и ток распределены равномерно. При атмосферном давлении и постоянном значении коэффициента лучеиспускания $\alpha = 0{,}6$ напряженность поля в столбе с учетом уравнения (1.2) имеет вид

$$E = 2{,}05\cdot 10^8 U_i^{29/12} g_e / a^{1/3} I^{1/3}. \quad (1.5)$$

Средняя плотность тока в столбе

$$j_{\text{ср}} = 5{,}5\cdot 10^{-8} U_i^{25/12} a^{2/3} / g_e^{2/3} I^{1/3}, \quad (1.6)$$

где g_e — сечение столкновения атомов с электронами. Видно, что наиболее существенным фактором, определяющим напряженность поля и плотность тока в столбе, является потенциал ионизации газов атмосферы дуги, затем по значимости следуют сечение столкновения электронов с атомами, ток, соотношение статистических весов.

При сварке стальными плавящимися электродами в защитных газах свойства столба в основном определяются потоками паров электродов, поэтому в расчетные уравнения вводят параметры U_i, g_e и a, свойственные соответствующим парам материала электродов. Существенное значение имеют теплофизические свойства газов — теплопроводность, энергия диссоциации и др.

Наиболее важные характеристики приэлектродных областей — плотность тока, падение напряжения, размеры активных пятен. Точное измерение этих величин затрудняется высокой температурой сварочной дуги, малыми размерами зон, подвижностью катодного пятна.

Экспериментально определено суммарное значение катодного и анодного падения напряжения. В дугах с металлическими электродами в воздухе экспериментальные значения U_a, полученные разными исследователями зондовым методом, находятся в пределах 2—11 В и зависят от материала электродов [97]. Для дуги между железными электродами на воздухе $U_a + U_к = 17...19$ В. С введением ионизаторов K_2CO_3, Na_2CO_3, $Ba(NO_3)_2$, Li_2CO_3 и $CaCO_3$ значение $U_a + U_к$ сни-

жается соответственно до 9,8; 13,8; 13,85; 13,5 и 15,95 В. Разделение значений $U_а$ и $U_к$ проводится на основании калориметрических опытов и определения скоростей плавления катода и анода. Точность таких данных невелика.

Д. М. Рабкин предложил упрощенный баланс энергии на аноде [179]: $W_а + \varphi = W_{пл}$. Здесь пренебрегается теплопередачей от газового потока аноду и потерями на излучение, которые, по данным Б. Е. Патона, составляют до 25 % общих потерь [126]. Основной вывод работы [179]: значение $U_а$ мало зависит от величины тока и материала анода.

При ручной сварке покрытыми электродами сумма падения анодного и катодного напряжений равна 18—25 В, а падение напряжения в столбе — 3—5 В [49].

А. Г. Мазель определил значения $U_а + U_к$ для многих марок промышленных и опытных электродов [104], а также рассчитал $U_а$ и $U_к$ по скоростям плавления. Для различных электродов получены расчетные величины $U_к = 8...26$ В и $U_а = 6...8$ В. Значение $U_к$ возрастает с увеличением номинального напряжения дуги.

При сварке в защитных газах большое влияние на $U_к$ и $U_а$ в приэлектродных областях оказывает эффект сжатия столба дуги и активных пятен. В. И. Дятлов показал, что с увеличением тока $U_к$ в свободно горящей дуге снижается, а при переходе в режим сжатой дуги резко возрастает [44]. Для сжатой дуги в парах железа при радиусе катодного пятна 1 мм и токе 400 А расчет дает $U_к \sim$ $\sim$ 25...28 В, что близко к действительным значениям. По мнению А. И. Акулова, $U_к$ и $U_а$ не остаются постоянными, а возрастают с увеличением сварочного тока и диаметра электрода. При сварке в аргоне проволокой Св-08Г2С диаметром 1 мм с увеличением тока от 150 до 250 А расчетное значение $U_а$ возрастает от 2,5 до 3,5 В, а $U_к$ — от 8,5 до 9 В [1].

Экспериментальные данные о плотностях тока в активных пятнах при сварке плавящимися электродами немногочисленны. А. А. Алов определял плотность тока в пятнах по площади пятен, оставленных дугой при кратковременном горении [3]. На стальных электродах с увеличением тока от 60 до 190 А плотность тока в катодном пятне снижается с $4{,}4 \cdot 10^7$ до $1{,}2 \cdot 10^7$ А/м^2. Плотность тока в анодном пятне не зависит от величины тока и составляет $8 \cdot 10^6$ А/м^2.

По данным И. Д. Кулагина и А. В. Николаева, которые определяли размеры пятен по фотоснимкам, сделанным с экспозицией $(3...10) \cdot 10^{-6}$ с, плотность тока в анодном пятне между стальными электродами составляет $(1{,}5...1{,}8) \cdot 10^7$ А/м^2 и незначительно возрастает с увеличением тока [82]. Длина дуги мало влияет на $j_а$, а состав газовой среды влияет существенно. В дуге, горящей в CO_2 между железными электродами, плотность тока в анодном пятне составляет $2{,}72 \times$ $\times 10^7$ А/м^2, а в азоте, аргоне и на воздухе — соответственно $(1{,}43; 1{,}44; 1{,}50) \times$ $\times 10^7$ А/м^2. В катодном пятне на стали плотность тока равна $3{,}5 \cdot 10^7$ А/м^2.

Г. И. Лесков установил, что при заданном материале катода дуговое напряжение не зависит от материала анода, если потенциал ионизации его паров не ниже такового паров катода [97]. Следовательно, можно пользоваться графитовыми анодами при исследовании дуг с металлическими электродами в парах соединений стабилизирующих элементов. Результаты измерений приведены в табл. 1. Плотность тока в катодном пятне выше, чем в анодном. Введение ионизаторов снижает плотность тока как в пятнах, так и в столбе.

Рассмотренные экспериментальные данные в основном относятся к свободно горящим дугам. В случае сжатых дуг, к которым относятся дуги при сварке под флюсом, в защитных газах, а в некоторых случаях и покрытыми электродами, зависимости, как показал В. И. Дятлов, будут иными [44]. Для сжатой дуги вводится ограничение $r_с =$ $=$ const (где $r_с$ — радиус столба дуги). В этом случае при увеличении тока будет пропорционально расти его плотность. Ток, при котором свободно горящие дуги переходят в режим сжатых дуг, тем меньше, чем меньше эффективный потенциал ионизации газа столба. Приведенные выше экспериментальные данные И. Д. Николаева подтверждают это.

Таблица 1. **Плотность тока в столбе и в активных пятнах сварочной дуги [97]**

Электрод		Ионизатор	$j_{ср} \cdot 10^{-7}$, А/м²	$j_a \cdot 10^{-7}$, А/м²		$j_к \cdot 10^{-7}$, А/м²	
Катод	Анод			Метод фотографирования столба дуги	Метод отпечатка	Метод фотографирования столба дуги	Метод отпечатка
Fe	Fe	Нет	1,6—2,5	1,6—2,0	1,3—1,8	2,0—2,5	1,8—2,3
Fe	C	»	1,4—2,5	1,4—1,7	—	2,0—2,5	1,2—2,4
Fe	C	K_2CO_3	0,2—1,2	0,2—0,4	—	0,8—1,2	0,9—1,2
Fe	C	$Ba(HO_3)_2$	0,5—0,8	0,5—0,8	—	1,5—2,0	1,2—1,8
Fe	C	$CaCO_3$	1,0—2,2	1,0—1,5	—	1,7—2,2	1,4—1,9

Дуга, горящая в CO_2, имела при одинаковых токах большую плотность. Опыты проводились в застойной атмосфере. Можно предположить, что при сварке в струе газа его сжимающее влияние проявляется в еще большей мере.

В дугах наблюдаются потоки частиц, исходящие из активных пятен. Скорость их колеблется в широких пределах и может достигать 10^3 м/с. В дуге между стальными электродами скорость потоков составляет 75—150 м/с [97].

В зависимости от величины тока результирующее действие струй от анода и катода изменяется, вследствие чего тепло дуги перераспределяется между ними. Потоки вызывают появление сил, действующих на электрод и изделие; изменяются перенос металла, глубина проплавления. Появление струй связывают с испарением электродов и силами сжатия, вызываемыми собственным полем дуги [203]. При постоянном токе усилие сжатия и давление пропорциональны плотности тока. Поэтому в области сужения дуги (например, в катодной области) возникает градиент давления, направленный от электрода перпендикулярно к его поверхности, что и приводит к появлению струи. Газ всасывается в струю из области вокруг пятна и прогоняется по направлению к столбу, захватывая пары материала электрода. Явление засасывания газа может оказывать большое влияние на процессы взаимодействия металла с газовой фазой. Роль испарения и сжатия в образовании потоков экспериментально пока еще точно не оценена. Существует предположение, что потоки не оказывают существенного влияния на ход основных процессов дугового разряда, хотя содействуют его стабилизации и в значительной мере определяют состав газа столба дуги [97].

Количество паров зависит от свойств электродного металла, режима и полярности сварки. Оно определено экспериментально и расчетным путем. По данным А. В. Петрова, при сварке плавящимся электродом в инертных газах в парообразное состояние переходит от 10 до 25 % электродного металла. Большему току соответствует большее количество испарившегося металла. И. Д. Кулагин и А. В. Николаев нашли, что количество испарившегося металла пропорционально току и времени горения дуги, которое в экспериментах было меньше, чем время существования капли. Коэффициент пропорциональности для железного электрода диаметром 5 мм при прямой полярности сварки и токе 100—200 А равен $0{,}2 \cdot 10^{-3}$ г/(А · с), а в интервале 300—1300 А — $0{,}6 \times \times 10^{-3}$ г/(А · с). По А. А. Ерохину отношение масс испарившегося и расплавленного металла для приведенных токов находится в пределах 0,05—0,15 [49]. Расчеты для нескольких способов сварки дали значения этого отношения, не превышающие 0,15. По расчетам Г. И. Лескова количество испарившегося металла при токе 200 А и прямой полярности составляет 12 % [97].

Приведенные данные позволяют сделать следующий вывод. Анодное падение напряжения и плотность тока в пятне j_a свободно горящих дуг мало зависят от режима сварки и состава стального

электрода. Анодное пятно малоподвижно. Сжатие дуги приводит к повышению U_a и j_a. Катодное падение напряжения $U_к$ и плотность тока в пятне $j_к$ свободной дуги Fe + Fe выше, чем U_a и j_a. Катодное пятно весьма подвижно и часто делится на несколько пятен. С увеличением тока до определенных значений наблюдается снижение $j_к$. При увеличении тока переход в режим сжатой дуги вызывает рост значений $U_к$ и $j_к$.

Изменение состава покрытия электрода и наличие постоянных примесей на поверхности катода приводят к значительному изменению $U_к$ и $j_к$. Введение ионизаторов способствует стабилизации катодного пятна, переходу к дугам без пятна и уменьшению $U_к$ и $j_к$.

Состав атмосферы дуги и расход газа могут оказать большое влияние на степень сжатия столба дуги и пятен. Чем меньше энергия диссоциации и больше теплопроводность газов, тем при прочих равных условиях больше степень сжатия столба и пятен.

2. Температура сварочной дуги

Температура дуги — один из важнейших факторов, определяющих физико-химические и металлургические процессы сварки. От температуры зависят степень диссоциации и ионизации газов в дуге, растворимость газов в металле, характер протекания процессов между газовой, металлической и шлаковой фазами, характер плавления электрода и переноса металла и т. д.

Сварочная дуга, которая характеризуется высоким значением тока, отличается и сравнительно высокой температурой плазмы ($T \approx 10^4$ К). Температура дуги зависит от тока, состава покрытия (газа) и электрода и других факторов. Например, всякое дополнительное охлаждение дуги (принудительное охлаждение электродов или столба дуги) 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 более узком канале. При этом в проводнике меньшего сечения выделяется больше тепла и он нагревается до более высокой температуры (при прежнем токе) [38].

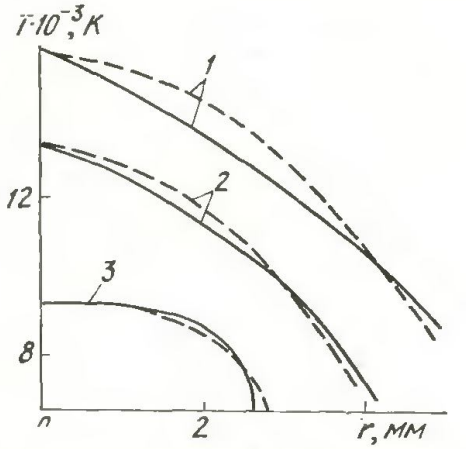


Рис. 2. Радиальное распределение температуры на расстоянии 5 мм в дуге длиной 10 мм: 1 — $I_{св}$ = 300 А; 2 — $I_{св}$ = 100 А; 3 — $I_{св}$ = 25 А [115].

Радиальное распределение температуры в аргоновой дуге, горящей между вольфрамовым катодом и водоохлаждаемым медным анодом, измерено в работе [115]. Установлено, что по мере удаления от катода и при уменьшении тока температура дуги и градиент dT/dr понижаются, радиус столба дуги увеличивается, а форма радиального распределения температуры изменяется от выпуклой к плоской (рис. 2). Поэтому короткая сварочная дуга характеризуется выпуклой формой радиального распределения температур. Штриховыми кривыми показаны радиальные распределения температуры, рассчитанные по формуле [79]

$$T(r) = T_0\left(1 - \frac{1}{2}\frac{r^2}{R^2}\right). \qquad (1.7)$$

Здесь r — текущий радиус; T_0 — температура на оси дуги; R — радиус, соответствующий $T_0/2$.

Экспериментальные и теоретические кривые $T(r)$ практически совпадают при $I < 100$ А, а при $I \geqslant 100$ А теоретические кривые проходят выше экспериментальных, что связано с увеличением потерь на излучение, отсутствие которых предполагалось при выводе формулы (1.7).

Пространственное распределение температуры вблизи электродов значительно

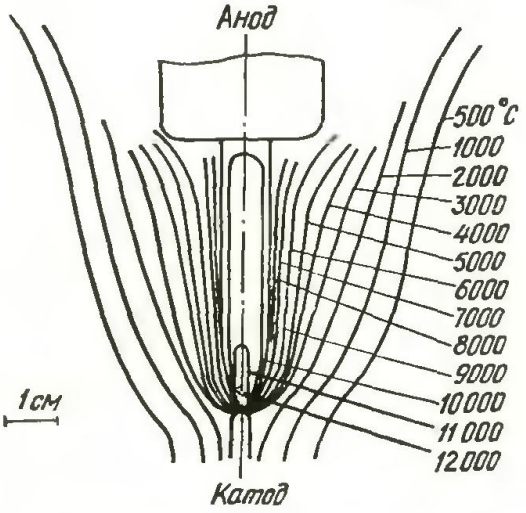


Рис. 3. Поле температур в угольной дуге в воздухе при токе 20 А [203].

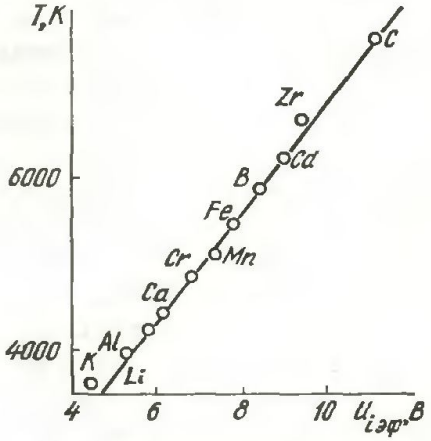


Рис. 4. Зависимость температуры столба от потенциала ионизации газа [187].

отличается от распределения в столбе, так как температура электродов обычно намного ниже, чем температура плазмы дуги. Распределение температуры может остаться аксиально симметричным, но теряет цилиндрическую симметрию [38]. Пример такого сложного распределения температуры в межэлектродном пространстве приведен на рис. 3.

Для оценки температуры сварочной дуги имеется простая зависимость [209] $T = 800U_{iэф}$ (рис. 4). В. И. Дятлов вывел зависимость температуры газа в столбе сжатой дуги от радиуса столба и плотности тока в нем [44]

$$T^{7/4}\alpha^{1/2} = \delta r_c^{1/2}/A, \qquad (1.8)$$

где δ — эффективный диаметр молекулы газа; A — постоянная.

При радиусе 0,1 см температура столба дуги, горящей в парах железа (U_i = = 7,9 В), на токах 200 и 400 А равна соответственно 6400 и 6600 К. В парах кальция (U_i = 6,1 В) температура дуги значительно ниже и при том же токе составляет 5000 и 5200 К.

В работе [15] измерена температура дуги между железными электродами — 5300 К. По данным [19] температура дуги между железными электродами при токе 280 А составляет 6100 К. При нанесении на стержень Na_2CO_3 и K_2CO_3 температура дуги снизилась соответственно до 4800 и 4300 К при том же токе. При 5 А температура дуги составила 5300 К, при 280 А — 6100 К, при 420 А — 6500 К.

Зависимость температуры столба дуги между стальными электродами в воздухе от тока, полученная в работе [20], приведена на рис. 5.

В работе [256] установлено, что с увеличением тока от 115 до 280 А температура дуги при сварке покрытыми электродами диаметром 3,25—5 мм увеличивается незначительно — от 5400 до 6040 К. Результаты этих исследований приведены в табл. 2. Видно, что средние температуры дуги для электродов различных типов лежат в относительно узких пределах.

При сварке под флюсом при увеличении тока от 300 до 800 А температура столба дуги, по данным [72], повышается от 6500 до 7250 К, а при дальнейшем росте тока изменяется незначительно.

Температура дуги при прямой полярности в сравнимых условиях примерно на 500 К ниже, чем на обратной. В исследованиях [148] также обнаружено, что интенсивность свечения дуги, определяемая ее температурой, при прямой полярности значительно ниже, чем при обратной.

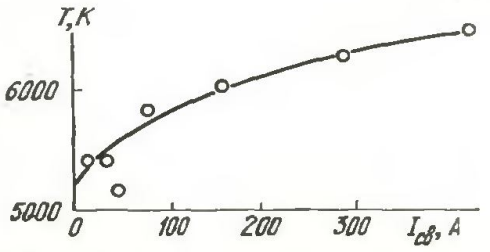


Рис. 5. Зависимость температуры столба дуги со стальными электродами в воздухе от тока [20].

Таблица 2. **Средняя температура дуги при сварке покрытыми электродами, К**

Покрытие электродов	$d_э$, мм			Для электрода данного типа
	3,25	4	5	
Руднокислое				
тонкое	—	5930	—	5930
толстое	5640	5590	5590	5610
Рутиловое				
тонкое	—	5820	—	5820
толстое	5600	5840	5800	5750
средней толщины	5800	5700	5710	5740
Руднокислое с железным порошком	5830	5560	5680	5690
Рутиловое с железным порошком	5650	5680	5660	5660
Основное	5450	5400	5480	5440

Влияние газовой среды на температуру дуги исследовалось в работе [250]. Установлено, что при сварке железными электродами в среде CO_2, N_2, воздуха, Ar и He температура дуги равна соответственно 5900, 5520, 5490, 5200, 4900 К. С увеличением напряжения между электродами температура дуги снижалась. Согласно этому, а также данным работ [203, 204], температура дуги при сварке покрытыми электродами, под флюсом и в защитных газах находится в пределах 4500—7800 К.

3. Механизм приэлектродных процессов

Известны многочисленные попытки объяснить механизм процесса горения дуги. Для описания эмиссионного процесса на катоде дуги использовались, как отмечено в работах [70, 182], почти все известные физические явления, сопровождающиеся испусканием электронов твердым телом. Можно насчитать по крайней мере 17 подобных описаний [28]. Кратко рассмотрим наиболее распространенные теории, точнее, гипотезы, которые предлагались для объяснения процессов в дуге.

Термоэлектронный механизм эмиссии (*Т*-механизм) предложен ранее всех других и успешно использован для описания поведения угольной дуги: оказалось возможным понять такие известные ее свойства, как возбуждение дуги разведением контактировавших электродов, неподвижность катодного пятна при перемещении анода и возможность повторного зажигания дуги после сравнительно больших пауз [92]. Однако применение термоэлектронного механизма к дугам, горящим на металлических электродах, оказалось безуспешным, так как большинство металлов не могут быть нагреты до температур, достаточных для заметной эмиссии электронов, а такие металлы, как ртуть, кадмий и цинк, имеют настолько низкие точки кипения при атмосферном давлении, что о них вообще не приходится говорить как о термоэлектронных эмиттерах, хотя дуга горит на этих металлах без каких-либо затруднений [70]. Но даже в тех случаях, когда возможен нагрев металла до температур, необходимых для поддержания тока дуги вследствие термоэмиссии, наблюдаются явления, которые невозможно объяснить с позиций термоэлектронного механизма. Так, на вольфраме может гореть электрическая дуга с катодным пятном, хотя сам катод остается холодным, а при нагреве его до высокой температуры дуга с пятном переходит в дугу без пятна, т. е. становится термоэлектронной [203].

Для объяснения явлений в дуге, которые не укладывались в рамки термоэлектронной гипотезы, привлекательным оказался механизм, предложенный Ленгмюром [274, 279]. На основании выведенного им уравнения тока, который ограничен объемным зарядом, Ленгмюр пришел к выводу, что у катода дуги под влиянием объемного заряда положитель-

ных ионов может возникать электрическое поле, достаточное для существенного снижения потенциального барьера и возникновения холодной эмиссии электронов (F-механизм). Появилась так называемая автоэлектронная гипотеза дуги, получившая широкое распространение, однако не ставшая общепринятой. Многие авторы [92, 121] высказывают обоснованные сомнения в применимости механизма автоэлектронной эмиссии к катодам дуг, горящих на металлических электродах. Отмечается, например, что для создания у катода напряженности поля порядка 10^7—10^8 В/см, необходимого для получения достаточной плотности эмиссионного тока, требуются очень высокие плотности тока, действие которого приведет к тому, что поверхность катода будет находиться в состоянии непрерывного теплового разрушения. В этих условиях, как указал Л. Леб [92], представляется сомнительным использование для вычисления автоэмиссионного тока значений работы выхода, температуры поверхности и других аналогичных характеристик материала катода, имеющих смысл только в случае твердого или жидкого состояния металлического катода. Известен также целый ряд экспериментальных фактов, которые не могут быть объяснены даже качественно с позиций автоэлектронной гипотезы. Так, например, авторы [121] отмечают, что автоэлектронный механизм эмиссии не объясняет зависимость плотности тока в катодном пятне от теплофизических свойств материала, зависимость ее от длительности импульса тока, полностью не объясняет причины локализации эмиссионного процесса в катодных пятнах определенного размера, не объясняет природу существования минимального диаметра катодного пятна и пороговых токов, не дает объяснения экспериментальным фактам образования нетермических высокоскоростных струй и т. д. Все перечисленное вызывает большие затруднения в применении автоэлектронного механизма к проблеме эмиссии электронов в катодных пятнах. К такому выводу приходили и другие исследователи [18].

Не изменяется положение дел и при переходе к термоавтоэлектронному (T — — F) механизму [275], который многим авторам представляется убедительным [14, 50]. Этот механизм предполагает усиление автоэмиссионного тока вследствие термического возбуждения электронов. Однако для катодов с низкой температурой кипения термическое возбуждение электронов может быть лишь незначительным и приемлемый термоавтоэлектронный механизм неизбежно превращается в сомнительный автоэлектронный [226].

К числу наиболее распространенных относится также термическая гипотеза Слепяна [306], которую в определенном смысле можно назвать антиподом автоэлектронной гипотезы [70]. В гипотезе Слепяна для объяснения механизма дуги в ее стационарном состоянии привлекается термическая ионизация газа в ионизационном пространстве над катодным пятном. Оттуда образующиеся ионы направляются к катоду, а электроны участвуют в переносе тока. Основным носителем тока в области катодного падения потенциала оказываются ионы в отличие от электронов при автоэмиссионном механизме. Основным недостатком этой гипотезы является то, что в в ней фактически полностью отрицается эмиссия с катода и поэтому становится непонятной его роль в дуговом разряде: с представлением о катоде только как о некоторой охлаждающей поверхности, ограничивающей нагревание газа, трудно согласиться. Возникают сомнения и по поводу законности применения уравнения Саха для определения степени ионизации в такой существенно неравновесной области, какой является пространство над катодным пятном [182].

Отмеченные выше трудности наиболее распространенных гипотез и неспособность их объяснить многие явления в катодном пятне дуги привели к тому, что вопрос о механизме дугового разряда длительное время оставался и по-прежнему остается открытым. Попытки найти новые подходы к решению проблемы настойчиво продолжаются [84, 75, 120, 101, 272, 264, 314, 252].

В отдельных случаях предпринимаются усилия для реабилитации старых пред-

ставлений. Так, например, авторы работы [121] вернулись к идее «горячих электронов», предложенной в 40-х годах Смитом. Согласно этой идее эмиссия электронов из катода в условиях дугового разряда может происходить без участия сильного электрического поля и не требуется нагрева металла или газа у его поверхности. Основная роль отводится вторичной электронной эмиссии, которая возникает в результате бомбардировки катода быстрыми электронами, образующимися вследствие максвеллизации первичных электронов в прикатодной области. Эта схема вызывает весьма эмоциональную критику [182], однако авторы [121] находят аргументы в защиту идеи Смита.

Из попыток найти новые подходы обращают на себя внимание работы, в которых авторы берут на вооружение идею о взрывной эмиссии электронов [22, 99]. Суть этого явления состоит в следующем. Металлический катод в виде острия, попадая в сильное электрическое поле, в течение короткого времени нагревается автоэмиссионным током (резистивный нагрев плюс эффект Ноттингама) и взрывается. Возникающая при этом плазма распространяется от катода, многократно усиливая эмиссию электронов.

Попытки использовать этот механизм для объяснения катодных процессов дуги вызывают большой интерес, однако встречают серьезные затруднения. Одно из них связано с необходимостью регенерации взрывающихся острий. Особенно неясен процесс регенерации в случае жидкого состояния катода, если вообще этот процесс может иметь здесь место. Кроме того, трудно ответить на вопрос, как можно получить необходимые для взрыва напряженности поля при типичных размерах микроострий порядка 10^{-5} см на поверхности катода и при катодном падении потенциала порядка 10 В [28].

Необходимо отметить также дальнейшее развитие работ на основе квантово-механического подхода, в которых рассматривается так называемый $I - T - F$-механизм эмиссии.

С целью преодоления расхождений результатов расчетов для плотности электронного тока и требуемых при этом условий на катоде дуги со значениями, получаемыми экспериментально, некоторые авторы [240, 125, 32, 33] предлагают учитывать действие индивидуальных полей ионов (ион-электронный или $I - F - T$-механизм). Предполагается, что ионы, приближаясь к поверхности катода, своим собственным электрическим полем вырывают из катода электроны, которые под действием внешнего поля, создаваемого катодным падением потенциала, свободно уходят в прикатодную зону, обеспечивая электронную компоненту тока в этой области дуги. Этот механизм эмиссии подробно рассмотрен в работах В. С. Гвоздецкого и Ю. Л. Васенина [33, 32], выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР. В первых работах [33] в классическом приближении вычислено количество электронов γ_e, эмиттируемых на один падающий ион через локально деформированный полем потенциальный барьер на границе металла. Показано, что $\gamma_e = 6...10$ электрон/ион.

Дальнейшим развитием этого подхода с учетом квантовых эффектов является работа [32], в которой сделана попытка учета упругого подбарьерного рассеяния электронов при туннелировании их сквозь потенциальный барьер, образуемый внешним электрическим полем, взаимодействием электрона с поверхностью металла и полем индивидуального иона.

Полученные результаты показали, что учет упругого рассеяния туннелирующих электронов на подбарьерном ионе приводит к увеличению числа эмиттированных электронов на один падающий ион по сравнению с вычисленным в работе [33].

Таким образом, В. С. Гвоздецкий и Ю. Л. Васенин пришли к выводу, что ион-электронный механизм эмиссии в сильных электрических полях оказывается способным обеспечить выход до 10^2 электронов на каждый падающий ион при полях, на порядок меньших, чем требуется для автоэлектронной эмиссии ($E_{авт} = 2 \cdot 10^8$ В/см). При возрастании напряженности электрического поля до значения $E_к = 2 \cdot 10^7$ В/см зависимость γ_e от температуры ослабевает и эмиссия

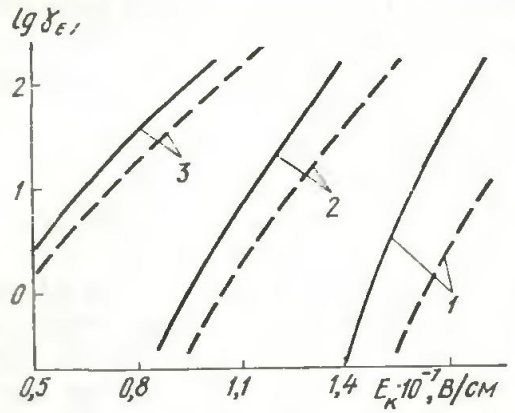


Рис. 6. Зависимость числа эмиттируемых электронов на один испаряющийся атом легкоионизируемой добавки материала катода от напряженности электрического поля у поверхности при температуре катода:

1 — 700 К; *2* — 1500 К; *3* — 2500 К; сплошные кривые — испарение атомов лантана, штриховые — атомов иттрия [132].

приобретает внешние черты автоэлектронной. На основе модели, рассмотренной в работах [33, 32], Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий и Ю. Л. Васенин предложили объяснение токопереноса на «холодном» катоде дугового разряда при испарении легкоионизируемых добавок материала катода [132]. Как и в предыдущих работах, для реализации предлагаемого механизма необходимо наличие у поверхности катода электрического поля $E_к \approx 10^7$ В/см. Условия образования такой высокой напряженности поля авторы работы [132] не рассматривают, объясняя это тем, что такая величина $E_к$ ниже, чем общепринятые ее значения в автоэлектронной модели. При этом роль испаряющихся атомов материала катода состоит в следующем. На небольших расстояниях l от поверхности катода до испарившегося атома металла его состояние (атомное или ионное) неразличимо из-за интенсивного обмена зарядом в данной системе металл — атом. По мере удаления атома от поверхности катода электронные энергетические состояния перестраиваются от зонной структуры в металле к дискретным энергетическим уровням атома (или иона). Такая перестройка заканчивается на некотором критическом расстоянии l_c от поверхности катода. Электрическое поле у катода изменяет потенциальную энергию поступившего на атом электрона так, что появляется возможность туннельного перехода электрона из связанного состояния на атоме в свободное, т. е. происходит полевая ионизация. Для существенного проявления этого процесса как раз и необходимо электрическое поле с напряженностью $E_к \approx 10^7$ В/см, которое обеспечивает выход освободившегося электрона в направлении столба дуги, т. е. его эмиссию. Количества γ_{ev} эмиттируемых электронов на один испаряющийся атом в работе [132] вычисляли с помощью ЭВМ на основе метода, изложенного в работе [33]. В качестве исходных выбирались следующие значения параметров основного металла: работа выхода электрона $\varphi = 4{,}5$ эВ, глубина зоны проводимости в модели свободных электронов металла $W_0 = 12{,}9$ эВ. В качестве легкоионизируемых добавок выбраны иттрий и лантан. Концентрацию этих элементов полагали незначительной, такой, что степень покрытия добавкой поверхности работающего катода $\theta \ll 1$ и работа выхода основного металла не изменялась. Атомы добавки характеризовались потенциалом ионизации U_i и атомным весом M_A. Скорость удаляющихся атомов полагали тепловой: $v_т^2 \sim kT_к/M_A$. Результаты вычислений представлены на рис. 6. Видно, что при низких температурах катода ($T_к \approx 700$ К) число электронов, эмиттируемых при испарении одного атома лантана, оказывается на порядок больше, чем при испарении одного атома иттрия. При этом повышение температуры катода до 2500 К приводит к уменьшению этого различия. Авторы объясняют это следующим образом. Во-первых, из-за большей массы атом лантана проходит расстояние l_c за время, в $\sqrt{M_{La}/M_Y}$ раз большее, чем атом иттрия, и поэтому происходит большее число единичных актов эмиссии электронов. Во-вторых, поскольку потенциал ионизации атома лантана меньше, чем атома иттрия, из металла на атомный остов лантана поступает большее число электронов с энергиями, при которых полевая ионизация более вероятна. С ростом температуры катода проявление этого различия в поведении атомов добавок ослабевает из-за возрастания числа термически возбужденных электронов металла, поступающих на удаляющиеся атомные остовы добавок. Как видно из

рис. 6, значения $\gamma_{ev} \approx 10...1 \cdot 10^2$ достигаются при таких напряженностях электрического поля и температурах катода, когда отношение плотности электронного тока к плотности ионного тока на катод, обеспечиваемое другими известными механизмами эмиссии, будет еще малой величиной.

На основании изложенного авторы работы [132] пришли к выводу, что предлагаемый механизм эмиссии электронов при испарении легкоионизируемых атомов с поверхности катода в электрическом поле катодного падения потенциала также может обеспечить выход до 10^2 электронов на один испаряющийся атом, а высокая эффективность этого механизма позволяет использовать его для объяснения токопереноса на «холодном» катоде дугового разряда.

Подводя итог краткого рассмотрения предложенных механизмов эмиссии, необходимо отметить, что несмотря на известный прогресс в понимании процессов, происходящих на катоде дугового разряда, длительный период их изучения пока еще не внес полной ясности в эту проблему. Более того, выявились новые особенности дуги, которые, как и уже давно известные (обратное движение катодного пятна, высокоскоростные потоки плазмы, электромагнитные колебания в широком диапазоне частот и др.), в существующие модельные представления не укладываются. Например, установлено наличие в дуге многозарядных ионов, а также ионов с энергиями, значительно превышающими приложенное между анодом и катодом напряжение. Оказалось, что обычное теоретическое предположение о том, что ионы по всему объему разряда движутся к катоду, является некорректным [28]. Была, наконец, обнаружена возникающая в отсутствие анода униполярная дуга [2, 253, 288].

Все эти экспериментальные факты еще не оказали соответствующего влияния на теоретические исследования, и поэтому многие особенности поведения катодного пятна дуги остаются пока непонятными.

В исследованиях механизма дуги значительно меньше внимания уделяется процессам на аноде. Объясняется это тем, что при рассмотрении процессов в области катодного падения необходимо прежде всего решить проблему образования носителей электричества, из которых 99 % составляют электроны [92]. Совершенно иная ситуация у анода.

Электроны, осуществляющие перенос тока в дуге, поступают на анод из столба и задача сводится к тому, чтобы объяснить механизм генерации в анодной области лишь 1 % носителей зарядов, необходимых для компенсации потерь заряженных частиц в осевом направлении [38]. Это обстоятельство и является причиной того, что анод обычно считают электродом, менее важным для поддержания дуги, чем катод. Однако на самом деле, несмотря на очевидные различия, процессы на аноде столь же сложны и пока еще мало изучены, как и на катоде. Для подтверждения сказанного достаточно упомянуть такие явления на аноде, как испускание плазменных потоков, стягивание тока в пятно, поведение анодных пятен и др. [203].

В настоящее время общей теории анодных явлений не существует, детально рассмотрены лишь отдельные ее вопросы [38]. К ним относятся две теории ионизации в анодной области. В первой из них предполагается, что в области анодного падения электроны, поступающие из столба, ускоряются, их энергия достигает величины потенциала ионизации газа или первого потенциала возбуждения: происходит прямая или ступенчатая ионизация нейтральных частиц (так называемая E-ионизация). Во второй теории считается, что энергия направленного движения, получаемая электронами при ускорении в анодном пространстве, превращается в результате многократных столкновений электронов друг с другом и с тяжелыми частицами плазмы в энергию неупорядоченного движения. При этом температура электронов достигает больших значений и ионизация у анода осуществляется наиболее быстрыми электронами максвелловского распределения по скоростям (T-ионизация).

В ряде работ авторы указывают на важную роль положительных ионов, которые могут быть эмиттированы анодом [209, 97]. Г. И. Лесков обратил внимание на поверхностную ионизацию как меха-

низм образования положительных ионов в анодной области [97].

Для случая легко испаряющегося материала анода высказаны предложения о влиянии паров металла на контрагирование дуги у анода [209], которое, в свою очередь, может приводить к появлению анодной струи [203].

При переходе к рассмотрению приэлектродных процессов в сварочных дугах возникает ряд новых вопросов. Упомянутые выше теоретические представления о механизмах дуги относятся к однородным металлам. При сварке покрытыми электродами дуга горит между каплей на торце электрода (или границей капли и покрытия) и ванной расплавленного металла. Капля и ванна покрыты слоем жидкого шлака, который получается в результате плавления электродного покрытия. Последнее у современных сварочных электродов представляет собой сложную рудо-минерало-металлическую композицию. Сварочные шлаки в твердом состоянии по электрическим характеристикам могут быть отнесены к диэлектрикам или полупроводникам, а жидкие шлаки — к ионным расплавам.

При повышенных температурах электропроводность сварочного шлака достаточно высока и поэтому присутствие слоя жидкого шлака не препятствует горению дуги. К. К. Хренов специальными опытами показал, что дуга может устойчиво гореть между угольным электродом и расплавленным стеклом, флюсом и т. д. [209]. Эти опыты повторил А. Г. Мазель [104]: электродные покрытия или шлаки, собранные после сварки, нагревались в графитовом тигле до расплавления и затем охлаждались. В процессе охлаждения фиксировалась возможность возбуждения дуги со шлаков и покрытий на угольный электрод. Установлено, что сварочные шлаки поддерживают дугу при температуре, близкой к началу размягчения. Нагретые покрытия, еще не прореагировавшие с металлом (в таком состоянии находится покрытие на торце электрода), поддерживают дугу при меньших температурах, чем шлаки.

Таким образом, свойства шлака должны оказывать очень сильное влияние на сварочную дугу. В связи с этим при рассмотрении процессов в такой дуге первостепенное значение имеют эмиссионные характеристики электродных покрытий и шлаков.

4. Термоэлектронная эмиссия шлаков

Для исследований качественного и количественного состава частиц, испаряющихся из сварочных материалов, использовалась экспериментальная масс-спектрометрическая установка, схема аналитической части которой приведена на рис. 7, схема измерительной части — на рис. 8. Основными частями ее являются масс-спектральный датчик МХ-7301, система форвакуумной и высоковакуумной откачки, камера образца с узлом нагрева, измерительными электродами и высоковакуумными вводами. Конструкция установки допускала высокотемпературный прогрев. Предварительное разрежение, необходимое для запуска высоковакуумного насоса, создавалось угольным адсорбционным насосом. Применение такой системы откачки позволило избежать появления загрязнений за счет вакуумного масла.

В установке имелось несколько вариантов узла *12*, предназначенного для нагрева образца.

В одном варианте спрессованная из исследуемого вещества тонкая таблетка помещалась в углубление танталовой подложки, которая нагревалась проходящим по ней переменным током. В другом варианте исследуемый образец нагревался в тигле электронной бомбардировкой или тепловым излучением накаливаемой спирали.

Установка имела следующие основные характеристики: остаточный безмасляный вакуум, получаемый без прогрева камеры за короткое время работы насоса НОРД-100, составлял около 10^{-5} Па, диапазон измерения массовых чисел положительных и отрицательных ионов — 1—100 а. е. м. при разрешении $M/\Delta M = 2\,M$ на высоте 50 % и 2—200 а. е. м. в обзорном режиме, нижний предел измерения электронного и ионного (без разделения по массам) тока — 10^{-12} А. Установка позволяла проводить широ-

кий круг высокотемпературных электрических и термодинамических исследований разнообразных сварочных материалов.

Исследования термоэлектронных и термоионных характеристик сварочных материалов выполнялись по методике, изложенной в работе [174].

После создания в камере предельного разрежения образец нагревался до расплавления при постоянном контроле температуры. Момент плавления образца шлака фиксировался по скачку температуры в сторону уменьшения из-за смачивания поверхности подложки расплавленным шлаком и связанного с этим изменения температурного режима подложки. Вольт-амперные характеристики снимались при различных значениях температуры образца по мере ее повышения и снижения и представлялись графически. По результатам измерений определялись значения работы выхода электронов. Для металлических образцов эти значения вычислялись по методу полного тока [41] с использованием уравнения Ричардсона

$$j_e = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_{п.т}}{kT}\right), \qquad (1.9)$$

где j_e — плотность тока электронов; A_0 — постоянная равная $1{,}20 \cdot 10^6$ А (м^2 · К^2).

Для определения значений работы выхода электронов из шлаков, помимо метода полного тока, использовался метод прямых Ричардсона, основанный на использовании уравнения термоэлектронной эмиссии,

$$j_e = A_1 T^2 \exp(e\varphi/kT), \qquad (1.10)$$

где A_1 — постоянная Ричардсона, определяемая для каждого образца по экспериментальным данным.

Разделение пучка отрицательно заряженных частиц, эмиттируемых исследуемым образцом, на электронную и ионную составляющие осуществлялось с помощью поперечного магнитного поля. Напряженность поля подбиралась так, чтобы оно отклоняло электроны и не препятствовало попаданию на коллектор отрицательных ионов. Такая методика использовалась при измерениях тока отрицательных ионов без разделения их по массовым составляющим, а вид ионов определялся масс-спектрометром.

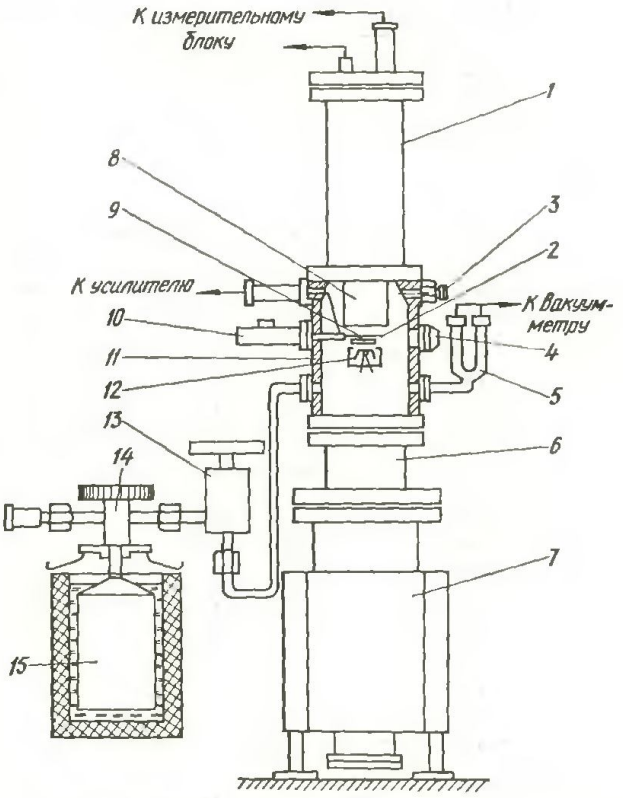


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для исследования термоэмиссионных характеристик сварочных материалов:

1 — датчик масс-спектрометра; *2* — коллектор; *3* — гермоввод; *4* — окно; *5* — манометрические лампы; *6* — переходная труба; *7* — насос НОРД-100; *8* — ионизационная камера; *9* — ускоряющий электрод; *10* — механизм перемещения коллектора; *11* — корпус камеры; *12* — узел нагрева; *13*, *14* — вентили; *15* — адсорбционный насос

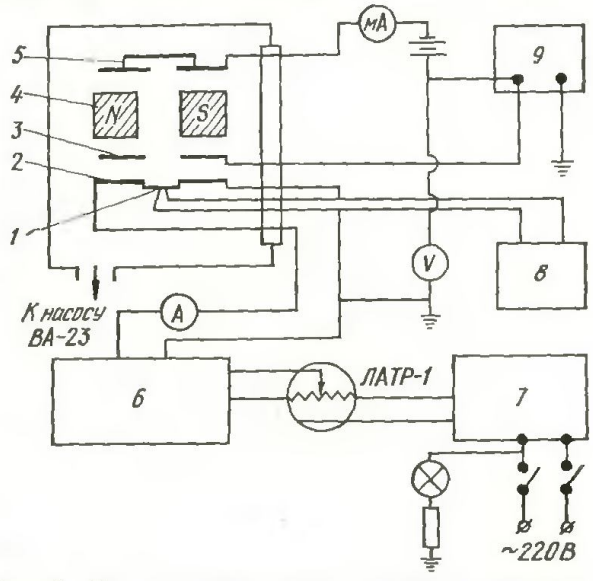


Рис. 8. Схема измерения тока эмиссии шлаковых систем:

1 — термопара; *2* — подложка; *3* — ускоряющий электрод; *4* — магнит; *5* — коллектор; *6* — накальный трансформатор РНО-250-10; *7* — стабилизатор напряжения СНЭ-0,75; *8* — компенсационный потенциометр ПП-63; *9* — универсальный источник питания УИП-1.

Таблица 3. **Термоэмиссионные свойства шлаков и флюсов**

SiO_2	$FeO + Fe_2O_3$	MnO	CaO	Al_2O_3	MgO	Cr_2O_3	CaF_2	Основность	Температура нагрева, К	$\varphi_{тв}$, эВ	$\varphi_{жидк}$, эВ	Литературный источник
57,50	8,55	15,90	—	17,05	—	—	—	—	—	2,22	—	[66]
55,00	9,85	17,40	—	18,25	—	—	—	—	1200	1,82	—	
54,50	26,70	12,65	1,75	3,97	0,43	—	—	—	1200	1,67	—	
46,90	31,10	14,75	2,04	4,71	0,50	—	—	—	1200	1,43	—	
44,47	32,59	15,46	2,13	5,50	0,55	—	—	—	1200	1,22	—	
33,60	2,05	1,33	29,40	2,26	29,72	—	—	0,86	—	—	4,71	[195]
21,75	1,95	1,21	47,13	5,06	19,60	—	—	2,1	—	—	4,14	
46,50	26,20	13,48	6,55	3,0	0,54	4,43	—	0,14	—	—	5,32	
59,45	13,92	18,48	1,12	4,54	0,97	0,48	—	0,019	—	—	5,57	
27,10	—	—	58,63	11,10	—	—	3,17	2,17	Около 1700	1,73	—	[144]
31,64	—	—	53,13	11,69	—	—	3,54	1,68	То же	1,83	2,41	
33,28	—	—	50,86	11,89	—	—	3,97	1,53	»	2,03	2,43	
38,24	—	—	46,50	12,36	—	—	2,90	1,22	»	2,15	2,69	
42,38	—	—	42,75	11,10	—	—	3,67	1,01	»	2,27	2,80	
47,18	—	—	37,36	11,87	—	—	3,59	0,79	»	2,55	3,05	
52,84	—	—	33,35	11,87	—	—	3,44	0,64	»	2,69	3,27	
41—44 *	2,0	34—38	6,5	4,5	5,75	—	4,5	—	1158	2,67	—	[105]
18—21,5 *	1,0	7—9	12—15	19—23	11,5—15	1,2	20—24	—	1270	2,97	—	
42,5—46,5 *	1,5	36—41	3—11	5,0	0,5—3	—	5—8	—	1370	3,40	—	

* Флюсы АН-348А, АН-22, АН-60

Таблица 4. **Состав шлаков для исследования термоэлектронной эмиссии.**

Номер серии	Номер образца шлака	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	CaF_2	K_2O	MnO_2	TiO_2	Na_2O
I	1	22,58	1,15	2,15	24,04	31,02	2,69	2,57	5,91	2,81
	2	17,03	5,30	1,40	25,98	26,53	2,63	1,83	11,58	2,77
	3	15,02	7,62	1,33	27,38	21,48	2,05	1,37	15,81	2,37
	4	15,95	8,03	1,12	28,31	15,62	1,86	1,35	19,16	2,43
II	1	20,40	1,86	3,22	25,59	25,71	2,37	4,41	4,15	3,16
	2	23,09	0,82	3,50	19,80	23,55	2,24	4,38	13,49	2,87
	3	20,57	1,32	3,85	29,25	24,30	2,19	4,82	14,21	2,90
	4	22,90	1,65	3,50	21,09	12,72	2,96	5,51	21,40	2,70

Учитывая возможность избирательного испарения некоторых компонентов шлака при длительном нагреве, «тренировку» образцов не проводили.

Следует отметить, что для шлаков понятие «работа выхода» не имеет такого ясного физического смысла, как для металлов. Сварочные шлаки многокомпонентны, пористы, могут обладать полупроводниковыми свойствами. Это сказывается на величине работы выхода электронов. Поэтому иногда целесообразно также использовать непосредственно данные по плотности тока эмиссии.

Надежность методики измерений проверялась путем определения работы выхода электронов для платины и тантала. Найденные значения (5,1 и 4,3 эВ) весьма близки к табличным. Погрешность эксперимента $\Delta\varphi = \pm 0{,}1$ эВ.

Определению величины работы выхода металлов различными методами посвящено большое число работ. Эмиссионные свойства полупроводников изучены в го-

раздо меньшей степени, хотя в последнее время этому вопросу уделяется большое внимание. Из полупроводниковых катодных материалов достаточно полно исследованы оксидные системы на основе BaO, SrO и CaO. Имеются работы по исследованию эмиссионных свойств сталеплавильных шлаков и некоторых сварочных флюсов [66, 67, 105, 106, 143, 195]. В работах [67, 144] сделана попытка связать изменения работы выхода с составом шлака и межфазными явлениями.

Из приведенных в табл. 3 данных видно, что в широком диапазоне составов работа выхода шлаков уменьшается с увеличением их основности. При расплавлении шлаков их работа выхода скачкообразно увеличивается, но сохраняется на достаточно низком уровне.

В наших экспериментах исследование термоэлектронной эмиссии наиболее детально проведено для шлаков, химический состав которых приведен в табл. 4.

При практически постоянном содержании CaO и $SiO_2 + Al_2O_3$ в них изменялось соотношение $CaF_2 : TiO_2$. Шлаки двух сравниваемых серий отличались друг от друга степенью раскисленности. В покрытиях электродов серии I раскислителей было больше. В этом случае по мере уменьшения количества CaF_2 в покрытии улучшалась стабильность горения дуги. При использовании же электродов серии II стабильность горения дуги была неудовлетворительна, причем она не улучшалась при снижении содержания CaF_2 в покрытии. Усредненные результаты 40—50 измерений напряжения зажигания дуги и $U_з$ при сварке электро-

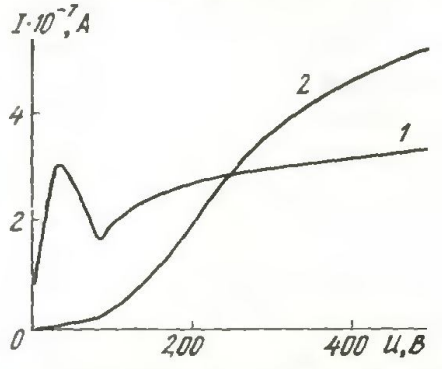


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики тока отрицательных частиц:
1 — шлак № 4 серии I, 1070 °С; *2* — то же серии II, 1170 °С.

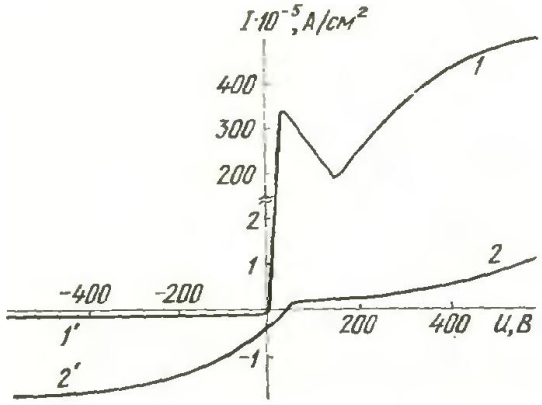


Рис. 10. Полные вольт-амперные характеристики тока отрицательных и положительных частиц, эмиттируемых из шлаков при 1300 К:
1 — шлак № 2 серии I; *2* — то же, серии II.

дами обеих серий на токе обратной полярности при $U_{х.х} = 135$ В (табл. 5) подтверждают эти наблюдения:

Номер серии	Номер электрода	$U_з$, В
I	1	33
	2	30
	3	26
	4	22
II	1	34
	2	37
	3	37
	4	35

В ходе экспериментов выявлено, что вольт-амперные характеристики отрицательно заряженных частиц, полученные для сравниваемых шлаков, существенно различаются. Для иллюстрации этого на рис. 9 показаны вольт-амперные характеристики, полученные для образцов № 4 обеих серий. Токи насыщения у них примерно одинаковы несмотря на значительную разницу температур, при которых получены эти кривые. При одинаковых же температурах эти токи отличались друг от друга на порядок и более (рис. 10).

В целом для шлаков серии I начало регистрации термоэлектронного тока при использовавшейся чувствительности измерительной схемы соответствует температуре около 1100 К, для шлаков серии II — температуре выше 1300 К.

Примечательно, что кривая *2* на рис. 9 возрастает несущественно в области малых значений ускоряющего напряжения. Кривая *1* в этом интервале напряжений

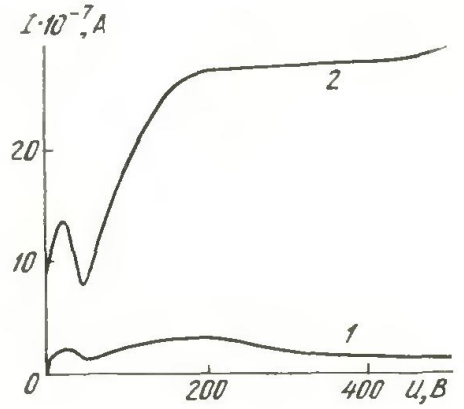


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики тока отрицательных частиц шлака № 2 серии I при 1020 °С:

1 — с отделением электронной компоненты магнитным полем; *2* — без ее отделения.

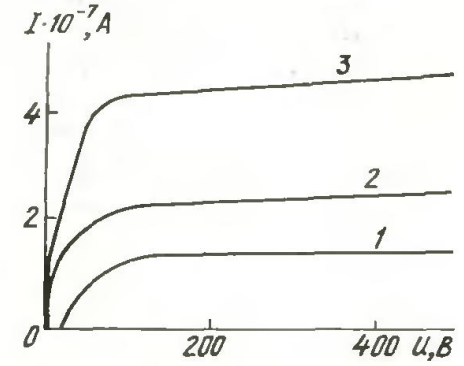


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики тока положительных ионов, эмиттируемых шлаком № 2 серии II:

1 — 970 °С; *2* — 990 °С; *3* — 1020 °С.

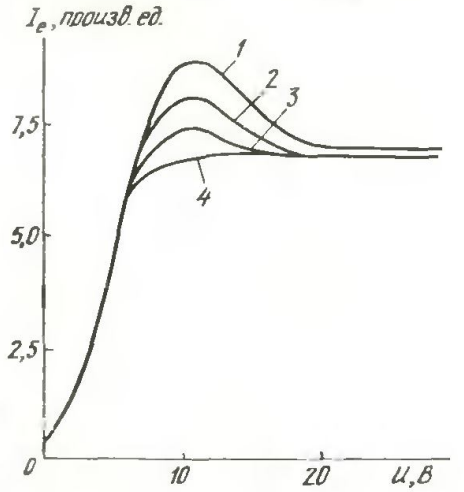


Рис. 13. Вольт-амперная характеристика термоионной эмиссии шлака серии I и ее изменение во времени при последовательности записи 1 → 4.

имеет резкий подъем с максимумом, который соизмерим по величине с плотностью тока насыщения.

Измеренные значения работы выхода электронов и константы Ричардсона для шлаков обеих серий приведены ниже:

Номер серии	Номер шлака	Работа выхода, эВ	A_1, $A/(см^2 \cdot °C^2)$
I	1	2,8	0,25
	2	2,3	0,06
	3	2,5	0,11
	4	2,6	0,03
II	1	3,2	0,41
	2	3,0	0,12
	3	3,1	0,06
	4	2,8	0,11

Видно, что работа выхода электронов исследованных шлаков значительно меньше по сравнению с таковой для железа (4,3 эВ), их эмиссионные константы на несколько порядков ниже, чем у металлов. Но поскольку плотность термоэлектронного тока определяется в основном работой выхода, то, как показывает расчет, плотность эмиссионного тока шлака в исследованном интервале температур намного превышает плотность соответствующего тока железа.

Эксперименты по изучению термоэмиссии шлаков с разделением электронной и отрицательной ионной компонент в поперечном магнитном поле показали, что в составе термоэмиссионного потока отрицательных частиц имеются не только электроны, но и отрицательные ионы (рис. 11). Результаты исследования отрицательных ионов изложены ниже.

Исследуемые шлаки эмиттировали также значительное количество положительных ионов (рис. 12).

Вид вольт-амперных характеристик тока отрицательных частиц для шлаков серии I показывает, что эти кривые не являются чисто термоэмиссионными, а представляют собой наложение различных процессов.

Для выяснения происхождения максимума вольт-амперных кривых проводили многократную запись этого участка характеристик с помощью двухкоординатного самопишущего потенциометра. Напряжение на подложке с исследуемым образцом и на коллекторе изменялось линейно, что давало возможность наблюдать характер изменения вида вольт-амперных кривых во времени. Из рис. 13

видно, что с течением времени максимум на вольт-амперной характеристике уменьшался вплоть до полного сглаживания кривой.

С целью получения более детальных сведений об особенностях термоэлектронной эмиссии из сварочных шлаков и, следовательно, о состоянии межэлектродного промежутка дуги, изучались кривые задержки электронов (рис. 14). По кривым задержки, используя формулу

$$T = -\frac{e}{k}\frac{dU}{d\ln j}, \qquad (1.11)$$

определяли температуру T распределения электронов. В случае танталовой подложки без нанесения на нее шлака эта температура оказалась равной 2250 К и отличалась от измеренной термопарой на 12 %.

При нанесении на подложку шлака вычисленные по формуле (1.11) значения T для шлака серии I составили 3200 и 3600 К, а измеренные с помощью термопары — соответственно 1880 и 2000 К. Такие большие различия значений T, а также существенно большее (для шлаков) смещение кривых задержки влево по оси U на рис. 14, объясняются тем, что шлак одновременно с электронами эмиттирует положительные ионы, которые обеспечивают компенсацию объемного отрицательного заряда, создаваемого термоэлектронами и отрицательными ионами, и этим создают условия для прохождения электронного тока при наличии в межэлектродном промежутке задерживающего поля более высокой напряженности по сравнению с полем в отсутствие положительных ионов. Благодаря этому может происходить усиление электронного тока и смещение кривых задержки в сторону больших значений задерживающего потенциала, что, в свою очередь, приводит к завышению значений T, определяемых по углу наклона кривых задержки. Подача положительного потенциала на промежуточный электрод подавляла эмиссию положительных ионов с подложки. В результате при достаточно высоком значении этого потенциала компенсирующее действие положительных термоионов устранялось и получались истинные кривые задержки термоэлектронов.

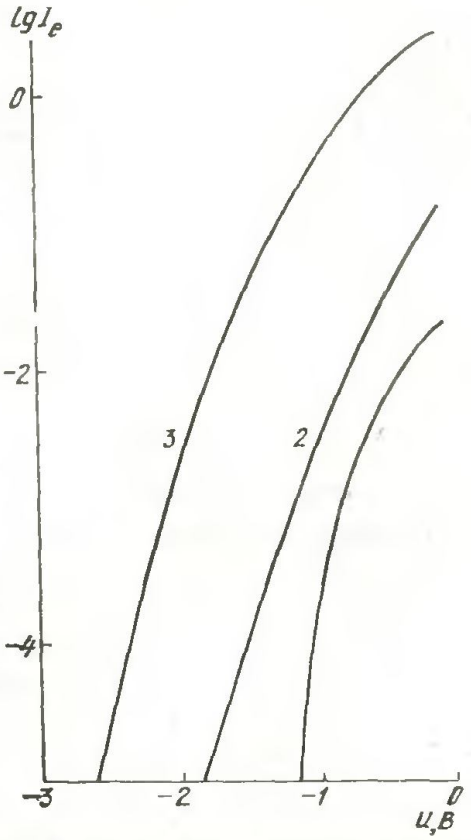


Рис. 14. Кривые задержки термоэлектронов, эмитируемых танталом и шлаком серии I:
1 — тантал, $T = 2000$ К; *2* — шлак, $T = 1880$ К; *3* — шлак, $T = 2000$ К.

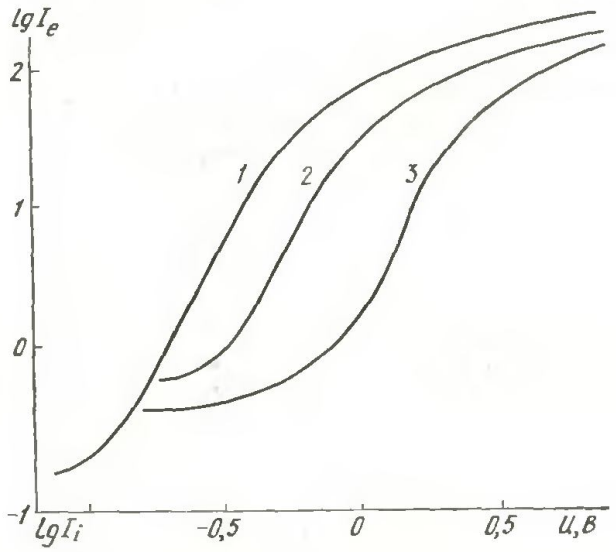


Рис. 15. Смещение вольт-амперной характеристики термоэмиссионного тока (*2*) под влиянием положительных (*1*) и отрицательных (*3*) ионов.

Такое объяснение подтверждено следующим экспериментом. Для одного из шлаков получена вольт-амперная характеристика при $T = 1650$ К (рис. 15,

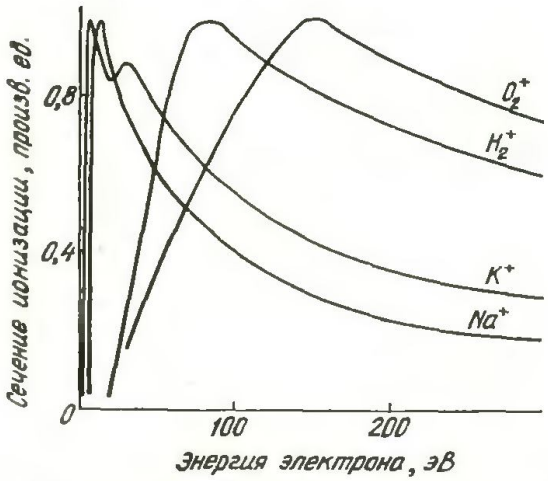


Рис. 16. Относительные сечения ионизации электронным ударом [231].

кривая *1*). Затем после продолжительного (в течение 20 мин) прогрева шлака при $T = 1750$ К снова была получена вольт-амперная характеристика (рис. 15, кривая *2*) при прежней температуре 1650 К. Видно, что новая кривая оказалась смещенной вправо по оси U. Это смещение объясняется уменьшением количества эмитируемых шлаком положительных ионов вследствие прогрева, о чем свидетельствует уменьшение их тока. Такое смещение, обусловленное уменьшением степени компенсации объемного отрицательного заряда, согласуется с результатами, полученными в работе [202] при исследовании вольт-амперных характеристик термоэмиссионных преобразователей.

Эксперимент был продолжен следующим образом. На ту же подложку с оставшимся на ней шлаком наносился флюорит, после чего она была нагрета до температуры 1720 К, выбранной таким образом, чтобы полученный термоэлектронный ток насыщения имел то же значение, что и в предыдущем эксперименте (кривая *2* на рис. 15). Полученная в этом случае вольт-амперная кривая *3* оказалась смещенной вправо по оси U относительно кривой *2*, несмотря на более высокую температуру и большую величину тока положительных ионов. Этот результат может быть объяснен тем, что при нанесении флюорита одновременно с термоэлектронами эмиттируются отрицательные ионы, которые усиливают действие объемного отрицательного заряда. С течением времени после испарения флюорита вольтамперная кривая смещается влево к своему прежнему положению.

Анализ возможных причин, вызывающих появление максимума на вольт-амперной характеристике (см. рис. 9), с учетом полученных результатов при изучении кривых задержки показал, что происхождение его может быть следствием двух механизмов.

Первый механизм связан с ионизацией в межэлектродном промежутке атомов, испаряющихся из шлаков. Наибольшую вероятность ионизации при малом напряжении (и соответственно при малых энергиях термоэлектронов) имеют атомы щелочных элементов. Рис. 16 иллюстрирует зависимость сечений ионизации некоторых элементов электронным ударом от энергии электронов. Ход кривых, выражающих эту зависимость в области небольших энергий электронов, аналогичен ходу вольт-амперных характеристик тока отрицательных частиц, представленных на рис. 9 (кривая *1*). Поэтому можно предположить, что атомы калия и натрия, испаряющиеся из шлаков, ионизируются термоэлектронами в межэлектродном промежутке. При этом происходит усиление электронного тока в результате появления новых электронов вследствие ионизации и компенсация образующимися ионами объемного отрицательного заряда, создаваемого электронами у поверхности исследуемого образца.

Вторым механизмом, вызывающим появление максимума на вольт-амперной кривой электронного тока, может быть компенсация объемного заряда термоэлектронов при небольших значениях ускоряющего напряжения положительными термоионами щелочных элементов, эмиттируемыми из шлаков. При малых значениях напряжения, ускоряющего эмиттируемые из шлака электроны, электрическое поле, создаваемое источником питания, не препятствует выходу термоионов. В этом случае одновременно происходит эмиссия электронов и положительных ионов. Ионы могут удаляться от поверхности на расстояния, определяемые начальными энергиями ионов и напряженностью тормозящего электри-

ческого поля. При этом объемный заряд отрицательных частиц у поверхности шлака компенсируется положительными термоионами.

По мере увеличения напряжения, ускоряющего электроны, поле становится таким, что положительные ионы уже не могут эмиттироваться. Компенсация объемного отрицательного заряда уменьшается, а плотность электронного тока снижается. Последующее увеличение плотности термоэлектронного тока возможно лишь при достаточно больших значениях ускоряющего напряжения, что и находит свое отражение на вольт-амперных характеристиках.

Щелочные элементы содержались во всех исследованных шлаках. Особенности же вольт-амперных характеристик, выражающиеся в виде максимумов на начальных участках кривых, обнаружены не во всех случаях. Это обстоятельство может быть объяснено различиями в эмиссионной способности шлаков. Если шлак эмиттирует незначительное количество электронов, то и эффекты усиления электронного тока незначительны, особенно в тех случаях, когда шлак эмиттирует еще и отрицательные ионы.

При исследовании термоэлектронной эмиссии из шлаков наблюдался еще один эффект. Установлено, что при температурах выше 1700 К и напряженности электрического поля $E \geqslant 500$ В/см происходит резкое увеличение электронного тока из шлака, слой которого после расплавления не подвергается длительной выдержке в расплавленном состоянии и имеет достаточно большую толщину (0,2—0,5 мм) (рис. 17). Особенно быстро растет ток при нагревании шлаков, обладающих повышенной эмиссионной способностью, у которых можно предполагать более высокую электропроводность (например, из-за наличия в шлаке нестехиометрических оксидов титана [4]). В этих случаях по мере повышения T и E может происходить лавинообразное увеличение электронного тока со временем при неизменном значении E.

Такое явление, как правило, наблюдалось при достижении плотностей термоэлектронного тока порядка 10^2 А/м^2 и может быть объяснено тем, что в рассматриваемых условиях имеет место так называемый режим поверхностного поля.

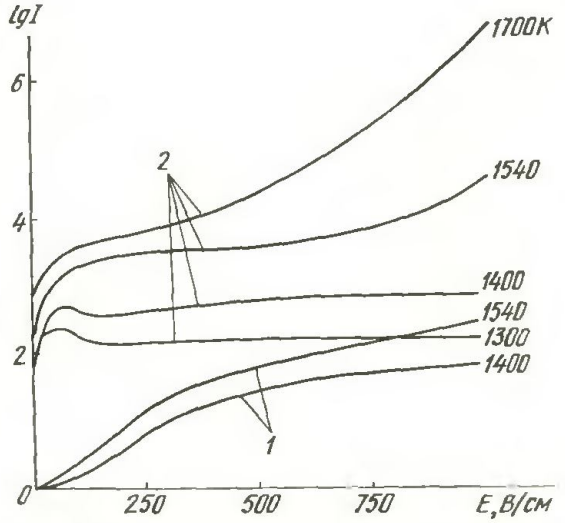


Рис. 17. Влияние напряженности электрического поля и температуры подложки на вольт-амперные характеристики электронной эмиссии шлаков

1 — шлак серии I; *2* — шлак серии II.

Этот режим [94] находится за областью насыщения в электронных лампах с полупроводниковыми катодами. Существование его обусловлено тем, что в поверхностном слое полупроводникового катода при прохождении в нем тока достаточной плотности создается электрическое поле, нарушающее равновесное состояние электронного газа в катоде [94]. В этом случае термоэлектронная способность катода оказывается непостоянной (при данной температуре катода), она возрастает с ростом катодного тока и зависит от электропроводности поверхностного слоя катода.

Уравнение, описывающее неравновесную термоэлектронную эмиссию, имеет вид [93]

$$j_{eн} \approx j_e e^{(\sigma E_п)^3}, \qquad (1.12)$$

где j_e — плотность тока по уравнению Ричардсона; σ — электропроводность поверхностного слоя полупроводникового катода; $E_п$ — напряженность электрического поля в поверхностном слое катода.

Согласно существующим представлениям [93] основная роль электрического поля $E_к$ в поверхностном слое такого катода заключается в том, что оно разогревает электронный газ, делает температуру его более высокой, чем температура

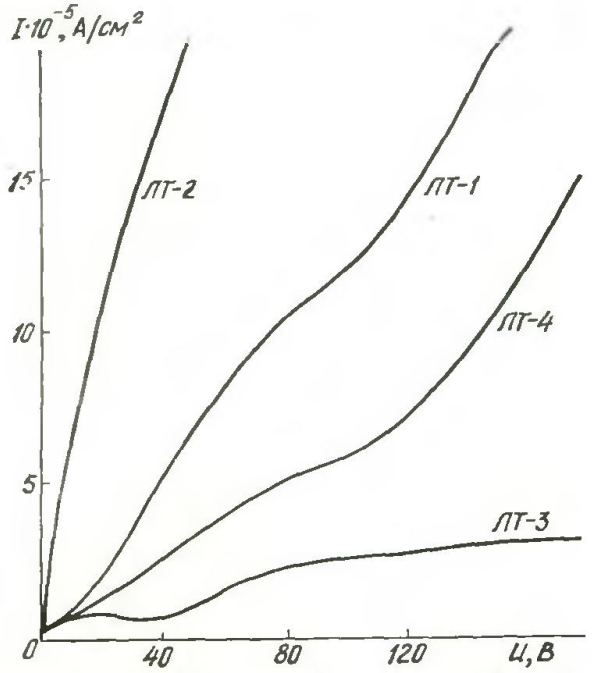


Рис. 18. Вольт-амперные характеристики тока отрицательных частиц шлаков серии ЛТ при температуре 1523 К.

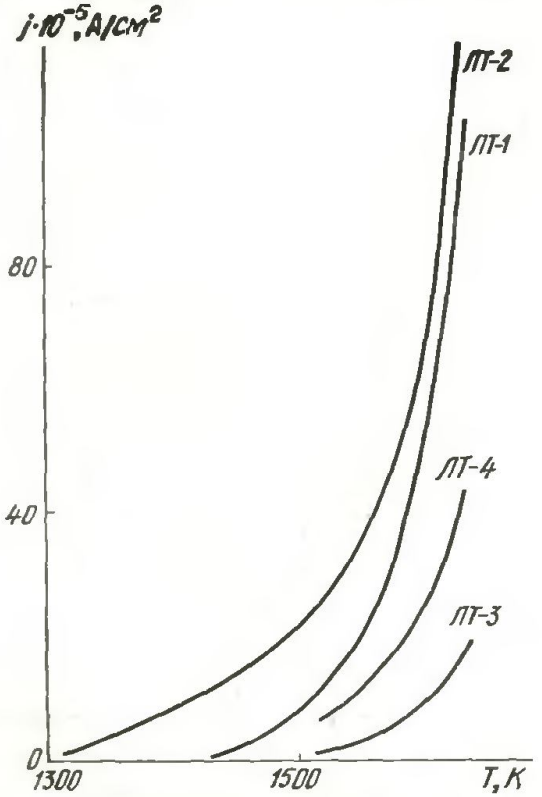


Рис. 19. Зависимость плотности тока эмиссии отрицательных частиц шлаков серии ЛТ от температуры при ускоряющем напряжении 60 В.

материала катода, и соответственно с ростом электронной температуры, по закону, близкому к экспоненциальному, возрастает эмиссионная способность катода.

Можно полагать, что в тех случаях, когда шлак покрывает сварочную ванну или торец электрода, по мере нарастания напряжения, прикладываемого от источника питания (например, при сварке переменным током), в зависимости от состава шлака могут создаваться условия для неравновесной электронной эмиссии, которая может влиять на характеристики дуги.

Термоэмиссия раскисленных шлаков. В этой серии исследовались эмиссионные

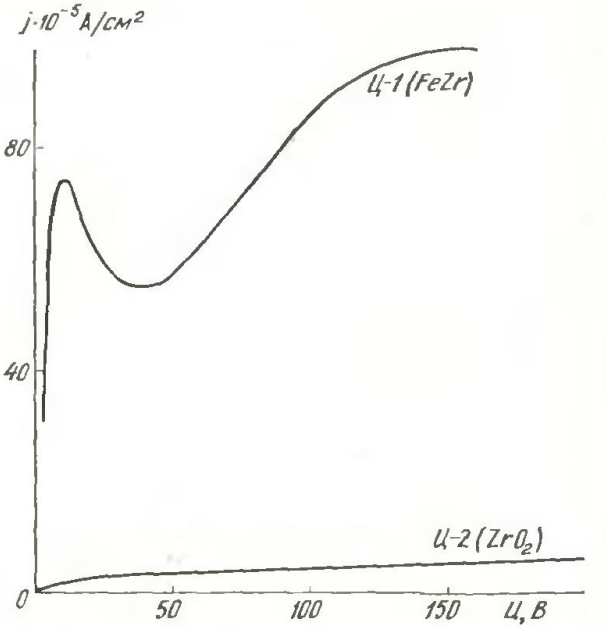


Рис. 20. Вольт-амперные характеристики тока отрицательно заряженных частиц шлаков Ц-1, раскисленных ферроцирконием, и Ц-2, нераскисленных, с ZrO_2 (T = 1400 К).

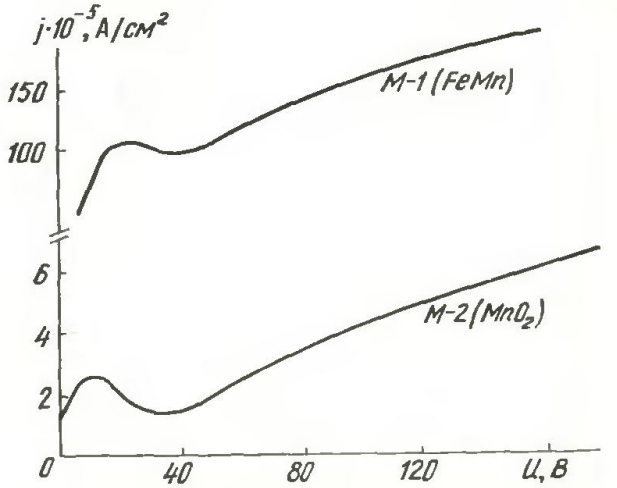


Рис. 21. Вольт-амперные характеристики тока отрицательно заряженных частиц шлаков М-1, раскисленных ферромарганцем, и М-2, нераскисленных, с MnO_2 (T = 1523 К).

свойства титаносодержащих шлаков в зависимости от степени раскисленности, а также влияние фтора на характер эмиссии этих шлаков.

Для опытов использовали шлаки, полученные при расплавлении электродов серии ЛТ. Состав покрытия электродов приведен в табл. 13, химический состав шлаков — в табл. 14.

На рис. 18 представлены вольт-амперные характеристики тока эмиссии отрицательных частиц исследуемых шлаков при 1523 К. Видно, что наиболее высокая плотность тока характерна для хорошо раскисленного шлака, не содержащего CaF_2 (ЛТ-2). На втором месте шлак нераскисленный (ЛТ-1). Добавка в эти шлаки CaF_2 снижает плотность тока эмиссии, но особенно сильно у шлака нераскисленного (ЛТ-3). Раскисление шлака ферротитаном (ЛТ-4) позволяет существенно ослабить такое действие фтора.

Влияние температуры на плотность эмиссионного тока при одном фиксированном напряжении 50 В показано на рис. 19. Легко убедиться, что эмиссия электронов раскисленными шлаками начинается при более низкой температуре, как с фтором (ЛТ-4), так и без него (ЛТ-2). Наиболее высокая температура для начала эмиссии необходима для нераскисленного шлака с фтором (ЛТ-3).

Работа выхода шлаков этой серии не рассчитывалась, так как в ходе эксперимента токи насыщения не были достигнуты.

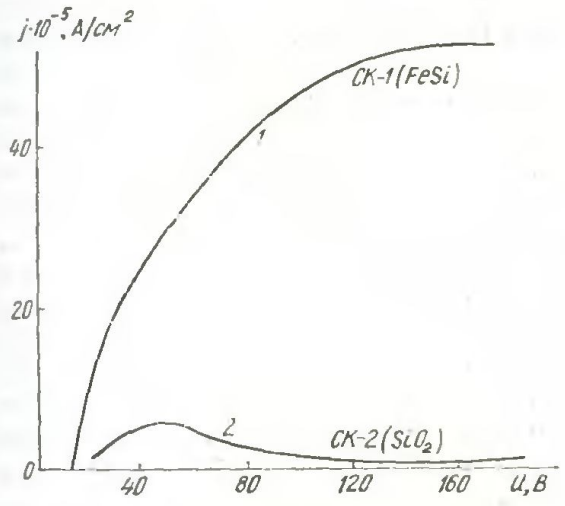


Рис. 22. Вольт-амперные характеристики тока отрицательно заряженных частиц шлаков СК-1, раскисленных ферросилицием, и СК-2, нераскисленных, с SiO_2 (T = 1523 К).

Таблица 5. **Работа выхода шлаков серий Ц, М и СК**

Индекс электрода	φ, эВ
Раскисленные	
Ц-1	3,72
М-1	3,80
СК-1	3,80
Нераскисленные	
Ц-2	4,07
М-2	4,12
СК-2	4,22

Таблица 6. **Работа выхода шлаков серий А и Т**

Шлак	φ, эВ
Раскисленные	
114 Т	3,55
115 Т	3,40
116 Т	3,39
117 Т	3,39
Нераскисленные	
114 А	3,81
115 А	3,80
116 А	3,89
117 А	3,81

Шлаки электродов с ферросплавами и оксидами циркония (Ц-1 и Ц-2), марганца (М-1 и М-2) и кремния (СК-1 и СК-2). Для исследований использовались фторидные шлаки, полученные при расплавлении электродов (табл. 16) с перечисленными ферросплавами и соответственно с оксидами этих элементов — ZrO_2, MnO_2 и SiO_2 в покрытии. На рис. 20—22 приведены вольт-амперные характеристики тока эмиссии отрицательных частиц исследуемыми шлаками. Видно, что во всех случаях раскисленные шлаки, полученные при плавлении электродов с указанными ферросплавами, обеспечивают повышение плотности эмиссионного тока больше чем на порядок по сравнению с нераскисленными шлаками. Работа выхода для шлаков этих серий представлена в табл. 5.

Аналогичные результаты получены для шлаков серий «А» и «Т». Значения работы выхода для них приведены в табл. 6. Видно, что и в этом случае рас-

кисление шлаков (раскислитель — ферротитан) также способствует снижению величины работы выхода, т. е. повышению их эмиссионной способности.

При определении эмиссионных характеристик вещества чаще всего ограничиваются исследованием эмиссии термоэлектронов. Но испускание электронов нагретыми телами всегда сопровождается термоэмиссией положительных и отрицательных ионов. Это особенно характерно для таких сложных по составу эмиттеров, какими являются сварочные шлаки, поэтому термоэмиссионные свойства шлаков в значительной степени определяются и этими видами эмиссии. Результаты изучения эмиссии шлаками положительных и отрицательных ионов изложены в следующих параграфах.

5. Положительная термоионная эмиссия шлаков

Для исследования были взяты два вида шлака, полученных при сварке опытными электродами. Состав покрытия, %:

Шлак	SiO_2	CaO	CaF_2	TiO_2	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MnO_2	MgO
1	21,36	37,2	—	20,16	17,0	0,52	1,67	0,70	0,22
2	20,09	23,74	8,01	20,80	23,0	0,42	1,48	2,18	0,18

Шлак снимали со сварного шва, измельчали и магнитом отделяли остатки железа. Затем шлак, растертый в мелкодисперсный порошок, разбавляли этиловым спиртом и наносили на танталовую подложку. Слой шлака толщиной 300—500 мкм хорошо сцеплялся с подложкой после испарения спирта. Для сравнения исследовались образцы из стали Ст. 08кп $\delta = 0{,}2$ мм, приваренные к подложке контактной точечной сваркой.

Термоионная эмиссия сварочной ванны (торца электрода) — один из источников поступления положительных ионов в приэлектродные области, включает в себя эмиссию ионов из шлака (покрытия), примесей из металла и самого металла.

Общий ток ионов, эмиттируемых шлаками, а также сталью марки Ст. 08кп, определялся качественно и количественно в интервале температур 900—1800 К. Масс-спектрометрические исследования термоионной эмиссии из шлаков проводились до 2000 К. Установлено, что по-

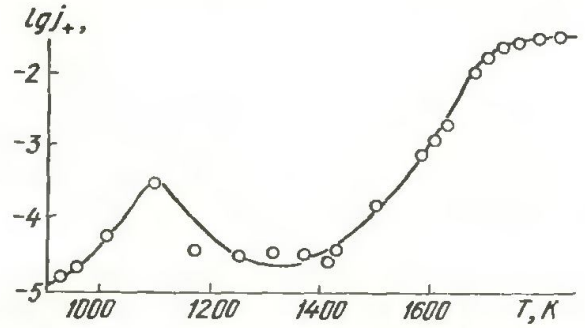


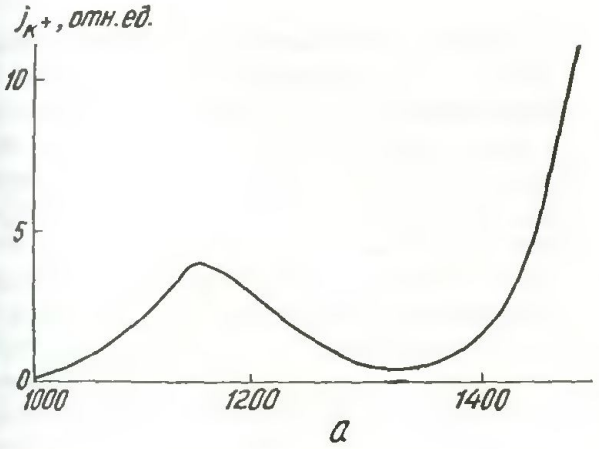
Рис. 23. Зависимость плотности термоионного тока от температуры образца из стали Ст.08 кп.

ток термоионов из стали Ст. 08кп состоит преимущественно из ионов примесей калия и натрия, подобно тому как это наблюдалось у других металлов [56]. Ионы щелочных элементов фиксировались уже при $T \approx 900$ К. Ионы $^{56}Fe^+$ зарегистрированы лишь при $T > 1600$ К, интенсивность их потока была в 10^3—10^4 раз меньше по сравнению с потоком ионов $^{39}K^+$. Зависимость общей плотности тока термоионов из стали Ст.08кп от температуры образца показана на рис. 23.

Исследование термоионной эмиссии из обоих шлаков показало, что в масс-спектрах их термоионов нет качественных различий. В изученном интервале температур главным образом эмиттируются ионы калия, кальция, натрия и в меньшей степени магния. Эмиссия ионов щелочных элементов наблюдается при $T \approx 900$ К, с повышением температуры их интенсивность быстро растет. Температурная зависимость тока этих термоионов имеет максимум при $T \approx 1100...$ 1200 К (рис. 24, *а*), который исчезает при повторных нагревах. При более высоких температурах термоионные токи из шлака возрастают непрерывно (рис. 24, *б*).

Термоионы Ca^+ и Mg^+ регистрируются лишь при высоких температурах, а при $T > 1750$ К ток ионов Ca^+ становится сравнимым с током ионов $^{39}K^+$ (см. рис. 24, *б*), что связано со значительным содержанием кальция в составе шлаков.

Для области температур до $T \approx 1550$ К



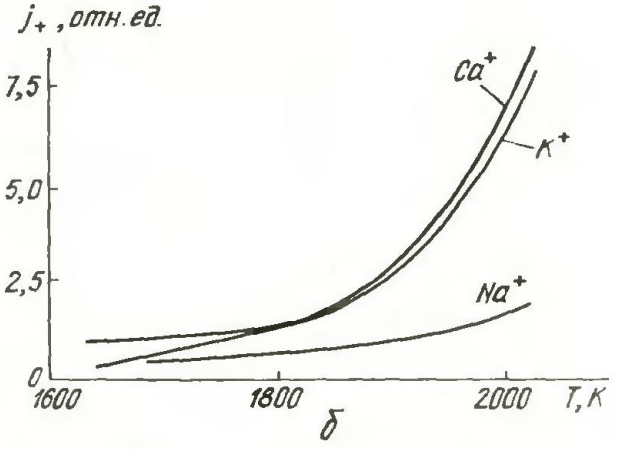


Рис. 24. Зависимость термоионной эмиссии из шлака от температуры:
а — при небольших ее значениях; б — при высоких значениях.

характерно значительное уменьшение интенсивности термоионов в первые 30—60 с с момента установления определенной температуры, после чего спад замедляется и значение тока становится постоянным (рис. 25). При повышении температуры до значений, больших точки плавления шлака, интенсивность термоионов не снижается во времени при любом значении T, а при еще более высоких температурах происходит даже рост сигнала во времени (в 2—3 раза) в пределах изученных интервалов (до 200 с).

Еще одна характерная черта поведения исследованных шлаков при температурах выше точки плавления — наблюдаемое в экспериментах возрастание плотности тока ионов при повторном нагреве (рис. 26). Особенно заметно такое увеличение ионного тока у шлака второго вида, что обусловлено более высоким значением работы выхода электронов из него. Если при идентичном режиме нагрева обоих

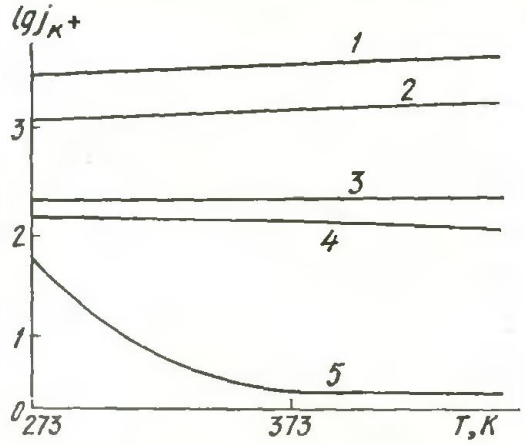


Рис. 25. Зависимость тока термоионов K^+ от времени нагрева:
1 — 1820 К; *2* — 1780 К; *3* — 1680 К; *4* — 1620 К; *5* — 1380 К.

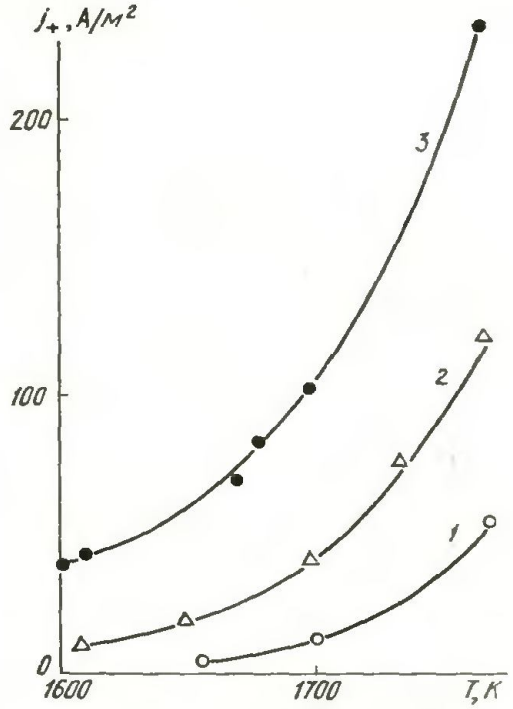


Рис. 26. Влияние температуры при последовательных нагревах *1, 2, 3* в одном эксперименте на плотность тока термоионов.

шлаков у образца второго вида шлака плотность тока в 1,5—3 раза больше соответствующего значения для образца первого вида, то при повторных нагревах это превышение еще более существенно.

Значение плотности общего тока ионов, эмиттируемых шлаками, превышают соответствующую плотность тока для стали в 10^2—10^3 раз и при 1700—1750 К составляют $(1...2) \cdot 10^2$ А · м$^{-2}$.

Наличие экстремумов на кривых, отражающих зависимость термоионных то-

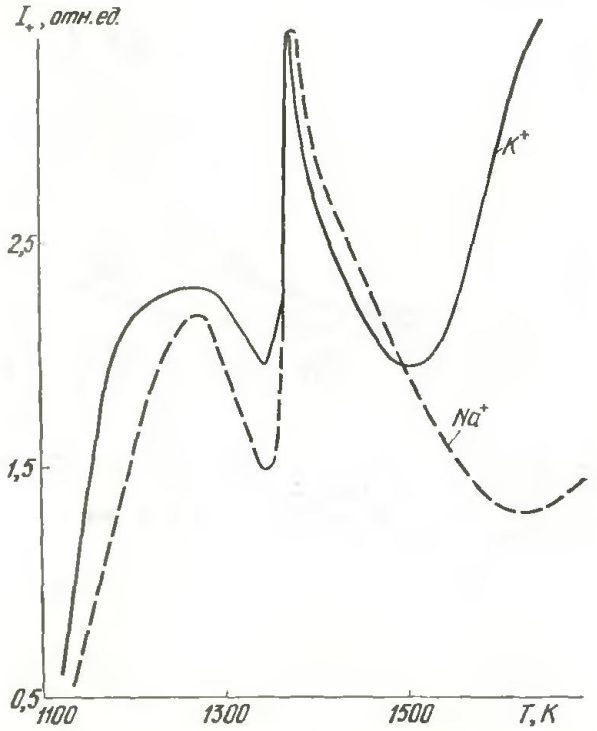


Рис. 27. Изменение тока положительных ионов щелочных элементов при нагреве смеси калиево-натриевого стекла с фтористым кальцием.

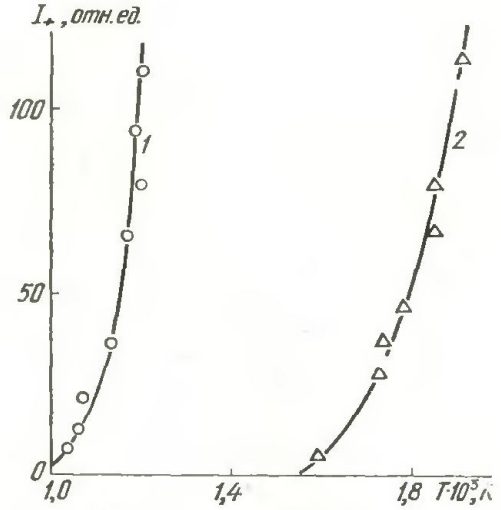


Рис. 28. Температурные зависимости тока ионов K^+ при нагреве смеси калиево-натриевого стекла:

1 — первичный нагрев; *2* — повторный нагрев.

ков от температуры (см. рис. 23, 24, *а*), можно объяснить испарением ионов и атомов калия и натрия из поверхностных слоев, приводящим к их обеднению щелочными элементами. Поступление этих элементов из глубинных слоев не успевает компенсировать их поток с поверхности, поэтому ионный ток уменьшается. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению потока щелочных элементов из глубинных слоев, что, в свою очередь, вызывает возрастание тока термоионов. По той же причине уменьшается во времени ионный ток из шлаков при неизменных значениях температуры в области $T < 1500$ К.

Уменьшением поступления щелочных элементов на поверхность стали вследствие разрушения каналов диффузии при плавлении металла объясняется снижение скорости нарастания ионного тока из стали при $T > 1700$ К (см. рис. 23).

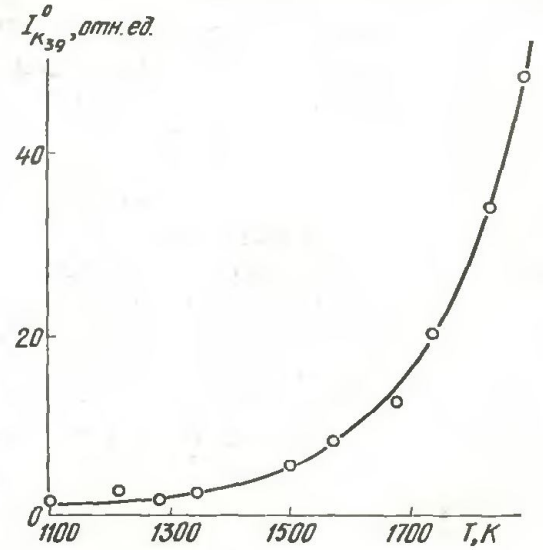


Рис. 29. Испарение атомов калия из шлака при нагреве.

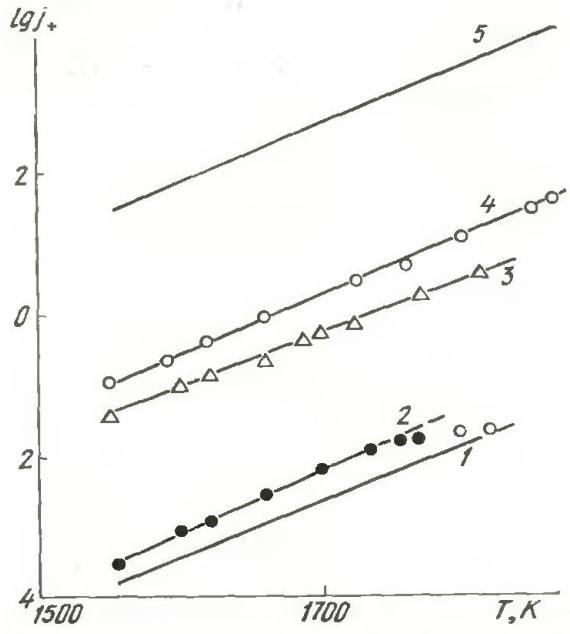


Рис. 30. Зависимость плотности тока электронов и ионов для стали Ст.08 кп. и ионов для шлака от температуры.

В гораздо большем количестве, чем при нагревании шлаков, положительные ионы калия и натрия эмиттируются при нагревании калиевого и калиево-натриевого стекла. Эмиссия ионов из стекол и их смесей с CaF_2 и другими компонентами сварочных материалов характеризуется сложной зависимостью от температуры (рис. 27) и весьма неустойчива во времени (рис. 28). Одновременно с эмиссией ионов наблюдается испарение нейтральных атомов щелочных элементов (рис. 29).

Влияние термоионной эмиссии из шлаков на дуговой разряд может заключаться в компенсации объемного отрицательного заряда, создаваемого электронами, и в поддержании степени ионизации газа вблизи электродов (образование отрицательных ионов и их роль в приэлектродных процессах рассмотрены отдельно).

Как известно [202], степень компенсации объемного отрицательного заряда положительными ионами характеризуется параметром

$$\beta = \frac{j_+}{j_e}\sqrt{m_+/m_e}, \qquad (1.13)$$

где j_+ и j_e — плотность соответственно токов ионов и электронов; m_+ — масса иона; m_e — масса электрона.

Из-за большого различия подвижностей ионов и электронов для компенсации объемного заряда, создаваемого электронами, требуется значительно меньшая плотность тока ионов, чем плотность электронного тока, образующего объемный заряд. Например, плотность тока электронов, объемный заряд которых может быть компенсирован полученной в описанных выше экспериментах при 1750 К плотностью ионного тока 2×10^2 А/м², составляет $2 \cdot 10^2 \sqrt{m_i/m_e} \approx 5{,}46 \cdot 10^4$ А/м², что соответствует работе выхода электронов $\varphi = 2{,}7$ эВ при этой температуре и превышает обычно наблюдаемые значения плотности тока повторного зажигания дуги переменного тока [97].

На рис. 30 представлены зависимости плотности токов ионов (кривая *2*) и электронов (кривая *3*) от температуры для стали Ст.08кп. Здесь же приведена плотность тока положительных ионов, необходимая для компенсации объемных зарядов, создаваемых при этих температурах термоэлектронами (кривая *1*). Видно, что небольшое увеличение электронного тока по сравнению со значениями, представленными кривой *3*, приведет к тому, что ионного тока будет недостаточно для компенсации объемного отрицательного заряда и при отсутствии других механизмов образования положительных ионов дальнейший рост электронного тока будет ограничиваться. На этом же рисунке приведена экспериментальная зависимость плотности термоионного тока из шлака второго вида от температуры (кривая *4*) и плотность электронного тока, объемный заряд которого может быть компенсирован термоионами из шлака при соответствующих значениях температуры (кривая *5*). Видно, что попадание шлака на поверхность сварочной ванны и торец электрода может обеспечить (благодаря эмиссии положительных ионов) компенсацию объемного заряда, создаваемого электронами не только при эмиссии, определяемой работой выхода из стали, но и при значительно большей плотности электронного тока. Поэтому отсутствие насыщения электронного тока в остаточной плазме между голыми стальными электродами [97] можно объяснить тем, что приложенного к электродам напряжения, а также имеющегося количества положительных ионов недостаточно для компенсации объемного отрицательного заряда, существующего у поверхности катода.

При сварке покрытым электродом компенсация в основном обеспечивается положительными ионами, в результате чего насыщение тока достигается при небольшом напряжении.

Из приведенных выше результатов следует, что в приэлектродных областях дуги благодаря одновременной термоэлектронной и термоионной эмиссии из шлака находится значительное количество электронов и ионов.

Оценим концентрацию ионов в приэлектродных областях, которую создает их эмиссия из шлаков. Как отмечено выше, плотность тока ионов, эмиттируемых шлаками, при $T \approx 1750$ К достигает $(1...2) \cdot 10^2$ А/м². По этим значениям с

учетом данных, представленных на рис. 30, можно найти плотность термоионного тока из шлаков при $T \approx 2000$ К. Плотность ионного тока равна (9...18) $\times$ $\times 10^2$ А/м^2.

Как известно [56], плотность тока частиц j_i связана с их концентрацией n_i соотношением $j_i = \frac{1}{4} n_i \bar{v}_i e$, где $\bar{v}_i$ — средняя тепловая скорость ионов с массой m_i при температуре T, $\bar{v}_i = \sqrt{8kT/\pi m_i}$. Получаем выражение для концентрации ионов в приэлектродной области $n_i = 4j_i/\bar{v}_i e$. Рассчитанная по этому выражению концентрация ионов в приэлектродной области, создаваемая термоионной эмиссией из шлака при 2000 К, составляет $n_i = 4{,}8 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. Можно показать, что для получения такой же концентрации ионов при термической ионизации газа, содержащего, например, 1 % атомов калия, при атмосферном давлении необходима температура $T \approx 2800...$ 2900 К. При температуре газа вблизи электродов 2000 К термическая ионизация для тех же исходных условий может обеспечить концентрацию ионов лишь 10^{18} м$^{-3}$.

Таким образом, при наличии на поверхности нагретого металла шлаковой пленки положительная термоэмиссионная эмиссия может существенно превышать эмиссию этих ионов из чистого металла, обеспечивая наряду с термической объемной ионизацией в межэлектродном пространстве, повышенную концентрацию положительных ионов в приэлектродных областях.

6. Эффективность образования положительных ионов при термической и поверхностной ионизации

Помимо положительной эмиссии и термической объемной ионизации еще одним эффективным источником положительных ионов может быть термическая ионизация на поверхности нагретого электрода нейтральных атомов, поступающих из разрядного промежутка.

Рассмотрим более подробно процесс поверхностной термической ионизации и сравним его эффективность с объемной термической ионизацией.

При отсутствии в межэлектродном промежутке электрического поля (например, в переходный момент в дуге переменного тока) плотности потоков ионов и атомов, движущихся в межэлектродном пространстве, определяются составом и температурой газа, который заполняет промежуток. При появлении электрического поля возникнут различия в движении ионов у электродов.

Предположим далее, что на поверхность электрода, имеющего температуру $T_э$ и работу выхода электронов φ, поступает поток атомов, плотность которого

$$j_a = \frac{1}{4} n_a \bar{v}_a, \qquad (1.14)$$

где n_a — концентрация частиц в объеме; $\bar{v}_a$ — их средняя тепловая скорость. Часть этого потока отражается от поверхности электрода в виде положительных ионов.

Плотность тока положительных ионов $j_п$, образующихся в результате поверхностной ионизации, определяется выражением [56]

$$j_п = \frac{1}{8} e n_a \bar{v}_a \exp\left[-(u_i - \varphi)/kT_э\right], \qquad (1.15)$$

где

$$\bar{v}_a = \sqrt{8kT/\pi m_a}, \qquad (1.16)$$

где m_a — масса атома.

Величина $\bar{v}_a$ содержит некоторую неопределенность, так как температура в приэлектродной области может отличаться от температуры в межэлектродном промежутке. Однако эта неопределенность не препятствует дальнейшему анализу, поскольку n_a обратно пропорциональна T, а $\bar{v}_a$ пропорциональна $T^{1/2}$ и, как видно из уравнения (1.14), изменение $\bar{v}_a$ при изменении T слабо отражается на значении j_a, поскольку $j_a \sim T^{1/2}$. Таким образом, плотность тока положительных ионов, образующихся вследствие поверхностной ионизации, зависит в основном от потенциала ионизации атомов, попадающих на поверхность электрода, работы выхода и температуры электрода при данном содержании ионизирующегося элемента в составе атмосферы промежутка.

Значения $j_п$, вычисленные при разных исходных условиях, показаны на рис. 31.

Поступление положительных ионов в приэлектродную область из межэлектродного пространства в переходный момент в результате беспорядочного теплового движения определяется [56] температурой и составом атмосферы межэлектродного промежутка, потенциалом ионизации атомов, температурой и массой ионов:

$$j_д = \frac{1}{4} e n_i \bar{v}_i, \qquad (1.17)$$

а с учетом уравнения (1.16)

$$j_д = \frac{1}{4} e n_a \alpha \sqrt{8kT/\pi m_i}, \qquad (1.18)$$

где α — степень ионизации атомов элемента, содержащегося в атмосфере промежутка; $\bar{v}_i$ — тепловая скорость ионов.

Вычисленные по формуле (1.18) зависимости $j_д$ от температуры межэлектродной атмосферы при концентрациях паров калия 1 % в одном случае и паров железа 1 и 10 % — в другом приведены на рис. 31.

Задавая параметрически температуру и состав атмосферы межэлектродного

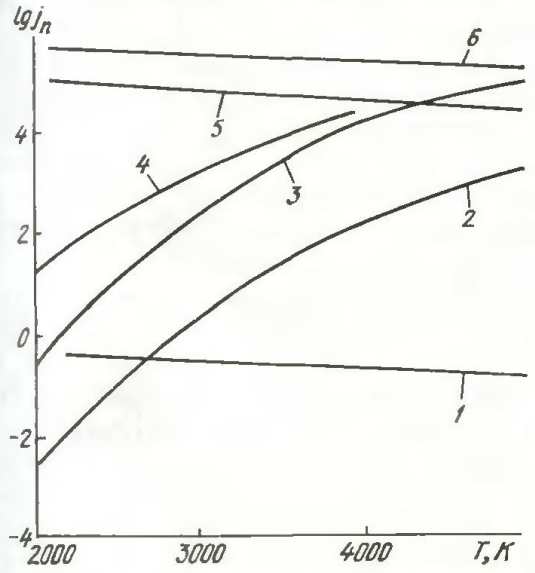


Рис. 31. Зависимость плотности тока ионов, образующихся при поверхностной ионизации атомов железа (*1*) и калия (*5*, *6*), а также ионов Fe^+ (*2*, *3*) и K^+ (*4*), поступающих к электроду из межэлектродного промежутка, от температуры межэлектродного газа ($T_э$ = 2100 К):

1, *3* — 100 % Fe в атмосфере дуги; *2* — 1 % Fe; *4*, *5*, *6* — 1 % K; *1*, *6* — φ = 4,31 эВ (Fe); *5* — φ = 3,95 эВ (Ti).

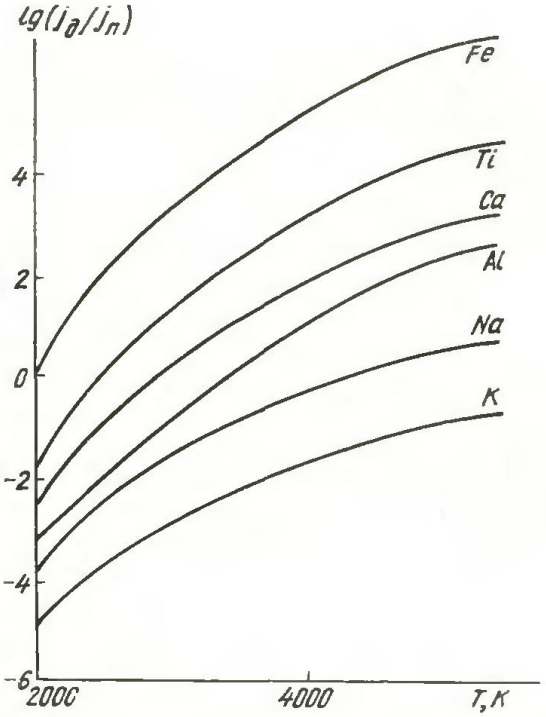


Рис. 32. Зависимость отношения плотностей тока ионов, поступающих в приэлектродные области из межэлектродного промежутка ($j_д$) и образующихся вследствие поверхностной ионизации на железном электроде ($j_п$) от температуры межэлектродного газа, (φ = 4,31 эВ, $T_э$ = = 2100 К)

промежутка, сопоставляем эффективности обоих механизмов поступления положительных ионов в приэлектродную область при данных значениях температуры электрода и работы выхода электронов:

$$j_д/j_п = 2\alpha \exp\left(\frac{U_i - \varphi}{kT}\right). \qquad (1.19)$$

На рис. 32 приведены зависимости логарифма отношения $j_д/j_п$ от температуры атмосферы, заполняющей межэлектродный промежуток, при определенных значениях работы выхода электрода (φ = = 4,31 эВ) и температуры электрода (2100 К). Для элементов с потенциалом ионизации, не превышающим потенциал ионизации калия (4,32 эВ), во всем интервале температур межэлектродной среды преобладающим механизмом образования положительных ионов является поверхностная ионизация. По мере увеличения T роль поверхностной ионизации уменьшается и, например, для кальция (U_i = 6,11 эВ) она существенна лишь при низких температурах межэлектродного газа, близких к темпера-

туре электродов. В остальных случаях основным источником положительных ионов является термическая ионизация в промежутке и поступление ионов к электродам.

Из полученных результатов следуют некоторые важные выводы.

Известно, что введение в межэлектродный промежуток легкоионизируемых элементов повышает разрывную длину дуги [209]. Приведенные выше результаты оценки эффективности различных механизмов образования положительных ионов показали, что поступление в атмосферу дуги только 1 % атомов калия позволяет получить за счет поверхностной ионизации на железном электроде (при $T_э = 2100$ К и $\varphi = 4{,}31$ эВ) плотность тока ионов, равную $4{,}7 \cdot 10^5$ А/м^2. При этом снижение температуры межэлектродной среды вплоть до $T_э$ не будет влиять на плотность этого ионного тока. (Поступление ионов из межэлектродного промежутка при тех же условиях может обеспечить, как видно из рис. 31, значительно меньшую плотность тока). Благодаря этому увеличение длины межэлектродного промежутка не отражается на приэлектродных областях, пока обеспечивается попадание достаточного количества атомов калия на электроды, несмотря на более сильное охлаждение межэлектродного промежутка. В результате разрывная длина дуги повышается.

Интенсивная поверхностная ионизация, происходящая на больших площадях поверхностей электродов, в сочетании с термоэлектронной эмиссией и диффузией электронов из приосевой зоны столба может играть значительную роль и в установившейся дуге постоянного тока, приводя ее к расфокусированию и придавая ей колоколообразную форму.

При анализе процессов, происходящих в дуге переменного тока, необходимо учитывать, что в отсутствие легкоионизируемых элементов в ее атмосфере основным источником поступления положительных ионов в приэлектродные области в переходный момент является термическая ионизация атмосферы межэлектродного промежутка. Длительность паузы от момента перехода тока в дуге через нуль до ее повторного зажигания составляет около 10^{-4} с. Согласно оценкам [97] время охлаждения плазмы железа до уменьшения степени ее ионизации в 10^5 раз составляет $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ с. Термическая ионизация уменьшается при этом в соответствии со снижением температуры межэлектродной атмосферы. В результате уменьшается и поток ионов из межэлектродного пространства к электродам в переходный момент. Поэтому даже те небольшие электронные токи, которые обеспечивает, например, железо с $\varphi = 4{,}31$ эВ, могут создавать в переходный момент нескомпенсированный объемный отрицательный заряд у поверхности электрода. Так, плотности термоэлектронного тока с железа при 2100 и 2500 К равны соответственно $2{,}48 \cdot 10^2$ и $9{,}3 \cdot 10^3$ А/м^2. Для компенсации создаваемых ими объемных отрицательных зарядов необходимы плотности тока ионов $7{,}9 \cdot 10^{-1}$ и $2{,}92 \times 10^1$ А/м^2. Здесь принято во внимание, что $(m_{Fe}/m_e)^{1/2} = 3{,}14 \cdot 10^2$, где m_{Fe} — масса иона железа.

Увеличение электронного тока, предшествующего повторному зажиганию, требует соответствующего увеличения ионного тока для поддержания необходимого режима компенсации у поверхности электрода, на котором формируется катод. Как показал проведенный выше анализ, термоионная эмиссия и поверхностная ионизация легко обеспечивают необходимые для этого плотности ионного тока: легкоионизируемые элементы в необходимом количестве всегда имеются в электродных покрытиях.

Необходимо, наконец, отметить, что положительные ионы, эмиттируемые анодом, могут играть значительную роль в создании результирующего объемного заряда, который определяет анодное падение напряжения. К. К. Хренов полагал, что такое влияние положительной ионной эмиссии может сказываться даже при небольшой плотности тока положительных ионов [209].

Численно оценить вклад этой эмиссии в объемный заряд у анода можно на основании следующих соображений. Если электрическое поле E в анодной области создается объемным зарядом только электронов, то оно описывается уравне-

нием $dE/dx = 4\pi e n_e$. При наличии тока положительных ионов с анода оно приобретает вид

$$dE/dx = 4\pi e (n_e - n_{i+}). \qquad (1.20)$$

Выразив концентрации ионов и электронов через соответствующие плотности токов этих частиц, уравнение (1.20) можно представить следующим образом:

$$dE/dx = 4\pi \frac{j_e}{v_e}\left(1 - \frac{v_e}{v_{i+}}\frac{j_{i+}}{j_e}\right). \qquad (1.21)$$

Значения скорости электронов v_e определяются напряженностью электрического поля в анодной области, а скорость положительных ионов v_{i+} непосредственно у анода можно считать тепловой. По мере удаления от анода v_e и v_{i+} изменяются, но можно показать, что отношение v_e/v_{i+} имеет значение порядка $\sqrt{m_{i+}/m_e}$:

$$v_e/v_{i+} \approx \sqrt{m_{i+}/m_e}. \qquad (1.22)$$

С учетом этого из уравнения (1.21) можно сделать вывод, что действительно ток положительных ионов с анода, даже имеющий небольшую плотность, составляющую 10^{-2}—10^{-3} плотности электронного тока, идущего из столба, может приводить к уменьшению напряженности электрического поля, а следовательно, и анодного падения напряжения.

Так как плотность электронного тока, поступающего на анод сварочной дуги, оценивается [97] в 10^7 А/м^2, значения плотности тока положительных ионов с анода, при которых становится существенным уменьшение анодного падения, составляют 10^5—10^4 А/м^2. Отсюда следует, что термоионная эмиссия и поверхностная ионизация легкоионизируемых элементов на аноде сварочной дуги могут быть факторами, определяющими величину анодного падения напряжения и соответственно мощность, передаваемую аноду.

Для проверки справедливости вывода о снижении анодного падения напряжения вследствие ионизации на поверхности анода легкоионизируемых элементов нами выполнены эксперименты по определению скорости плавления стальных стержней, характеризующихся различными значениями работы выхода электронов. В первом случае сварка осуществлялась непокрытыми стержнями, во втором на них, окуная, наносили слой жидкого калиево-натриевого стекла, в третьем случае стержни имели покрытие одного и того же состава (АНО-7), где в качестве связующего использовалось калиево-натриевое стекло. Сварка велась на обратной полярности при токе 100 А.

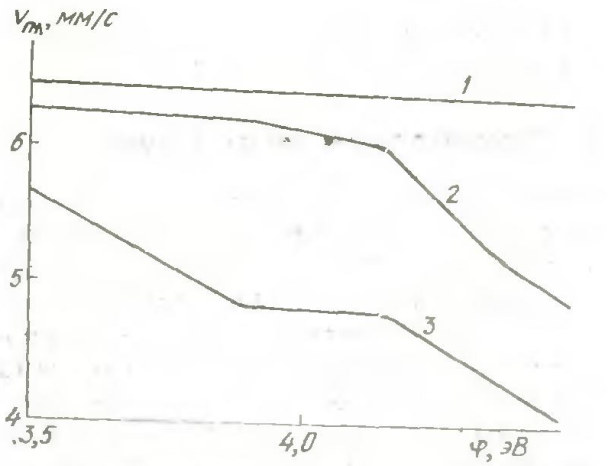


Рис. 33. Зависимость скорости плавления электрода от работы выхода электронов:
1 — непокрытые стержни; *2* — стержни, покрытые калиево-натриевым жидким стеклом; *3* — электроды с покрытием АНО-7 ($d_э$ = 4 мм, $I_{св}$ = 160 А)

Результаты экспериментов (рис. 33) показали, что по мере приближения работы выхода электронов к значению потенциала ионизации калия скорости плавления электродов и стержней с покрытием из калиево-натриевого стекла начинают заметно (на 15—25 %) изменяться, в то время как для непокрытых стержней скорость $v_{пл}$ от работы выхода электронов практически не зависит.

При $\varphi \leqslant 4{,}15$ эВ скорость плавления изменяется лишь у покрытых электродов. Увеличение $v_{пл}$ в этом случае при малых значениях работы выхода электронов (3,8—3,5 эВ) не может быть объяснено только влиянием положительных ионов, поскольку эффективность поверхностной ионизации снижается. Можно предполагать, что на $v_{пл}$ влияют отрицательные ионы, образующиеся при плавлении электродного покрытия, и от которых можно ожидать действия, противоположного действию положительных ионов.

Закономерности влияния отрицательных ионов на параметры дуги рассмотрены в следующем параграфе.

7. Отрицательные ионы в дуге

Предположение о влиянии отрицательных ионов на дуговой разряд впервые высказано в работе [209]. При исследовании действия различных веществ на устойчивость дугового разряда, оцениваемую по разрывной длине дуги, установлено, что соединения ряда легкоионизируемых элементов, особенно галоиды, дестабилизируют дугу. Для объяснения этого явления высказано предположение о вероятном образовании отрицательных ионов путем присоединения свободного электрона к электроотрицательному атому или группе атомов. К. К. Хренов отмечал, что обогащение плазмы разряда тяжелыми отрицательными ионами при соответственном уменьшении количества свободных электронов должно резко уменьшить электропроводность плазмы, так как подвижность тяжелых отрицательных ионов во много раз меньше подвижности свободных элетронов. Для поддержания необходимого тока напряженность электрического поля в столбе должна повыситься. Кроме того, наличие тяжелых малоподвижных отрицательных ионов должно увеличить вероятность рекомбинации ионов с образованием нейтральных молекул. Обе причины — уменьшение подвижности и усиление процессов рекомбинации — ухудшают условия существования дуги и уменьшают ее устойчивость. Для оценки вероятности образования отрицательных ионов в работе [209] применен термодинамический подход: из факта, что процесс является экзотермическим (например, при образовании отрицательного иона хлора освобождается энергия 89 000 кал/(г × × моль), или 3,85 эВ), логично заключить, что отрицательные ионы хлора образуются самопроизвольно. Приведенное объяснение, как отметил сам автор [209], требовало экспериментальной проверки и уточнения.

Предложенный в работе [209] механизм влияния электроотрицательных элементов на дуговой разряд критикуется А. Г. Мазелем [104]. Его точка зрения сводится к тому, что стабильность дуги постоянного тока определяется не ионизацией столба, а эмиссионной способностью катода дуги. Поэтому образование отрицательных ионов в плазме столба не может оказывать существенного влияния на разряд, а действие электроотрицательных элементов проявляется через эмиссионные свойства катода. Для подтверждения своей точки зрения А. Г. Мазель приводит следующие соображения. Если ионизация столба оказывает решающее влияние на устойчивость саморегулируемой сварочной дуги, то источник тока должен в столбе затрачивать основную часть своей энергии. В действительности в столбе расходуется менее 30 % энергии источника тока, а основная доля ее расходуется в приэлектродных областях дуги.

Эту точку зрения подтверждает одна из ранних работ Г. М. Тиходеева [197], на которую ссылается А. Г. Мазель. В ней установлено, что явление «блуждания дуги» при сварке на прямой полярности связано с повышенным содержанием кремния в проволоке (0,21—0,24 %). Анализ неметаллических включений в таких проволоках показал, что их количество доходит до 0,06 % и они состоят в основном из SiO_2 и Al_2O_3. На основании этого Г. М. Тиходеев предположил, что Al_2O_3 и SiO_2 отрицательно влияют на устойчивость дуги, ухудшая эмиссию электронов с катода. Измерения плотности тока термоэлектронной эмиссии с платиновой проволоки, покрытой оксидами различных элементов, показали, что Al_2O_3 и SiO_2, ухудшавшие устойчивость дуги, одновременно уменьшали эмиссию электронов с катода. Таким образом, как утверждает А. Г. Мазель, точка зрения Г. М. Тиходеева, считавшего, что стабильность горящей дуги постоянного тока определяется не ионизацией столба, а эмиссионной способностью катода, правильно отражает физическую природу явлений, протекающих в различных зонах дуги, поэтому парам галоидов нельзя приписывать деионизирующее действие на плазму непрерывно горящей дуги.

Для подтверждения этого предположе-

ния в работе [104] приведены результаты следующего опыта. При нанесении химически чистых обезвоженных хлористых солей $BaCl_2$, $MgCl_2$ и $PbCl_2$ на проволоку Св-08А $PbCl_2$ хорошо стабилизирует дугу, а $BaCl_2$ и $MgCl_2$, хотя и в разной степени, но ухудшает ее стабильность. Результаты визуальных наблюдений подтверждены при определении разрывной длины дуги. Отмечается далее, что из всех солей наименьшую энергию диссоциации имеет $PbCl_2$, поэтому плазма дуги в этом случае должна наиболее интенсивно насыщаться ионами хлора, считающимися наиболее активными деионизаторами. На самом деле картина получилась обратная: $PbCl_2$ хорошо стабилизирует дугу. По мнению автора [104], эти результаты убедительно показывают, что стабильность горящей дуги не имеет прямой связи со степенью ионизации плазмы и должна быть связана с условиями протекания тока на катоде дуги. В связи с этим предлагается следующий механизм влияния указанных хлористых солей на дуговой разряд. Соль $PbCl_2$ улучшает эмиссию электронов на катоде вследствие того, что эта соль эмиттирует при нагреве только отрицательные ионы и пленка соли, покрывающая катод, получает положительный заряд, который снижает потенциальный барьер на поверхности катода. Действие $MgCl_2$ оказывает обратное действие, так как при нагреве она эмиттирует только положительные ионы и пленка заряжается отрицательно, увеличивая потенциальный барьер на поверхности катода. Соль $BaCl_2$ при нагреве эмиттирует ионы обоих знаков, и поэтому оказывает промежуточное действие на стабильность дуги. Однако неясно, например, куда попадают отрицательные ионы хлора, которые для поддержания положительного заряда на поверхности должны непрерывно эмиттироваться из пленки соли $PbCl_2$ при ее нагреве и может ли вообще такая пленка длительное время существовать на катоде в условиях высоких температур катодного пятна. Трудно объяснить на основе предлагаемой схемы влияние на дуговой разряд газообразных фторидов.

В работах [8, 10] показано, например, что введение в инертные газы (аргон, гелий) гексафторида серы в количестве 1,5—2 % или BF_3 в количестве 0,02—0,5 % вызывает резкое изменение основных характеристик дуги: существенно сжимается (контрагирует) столб дуги, увеличивается напряжение между электродами, повышается мощность, выделяющаяся на аноде (примерно на 30—50 %) (рис. 34).

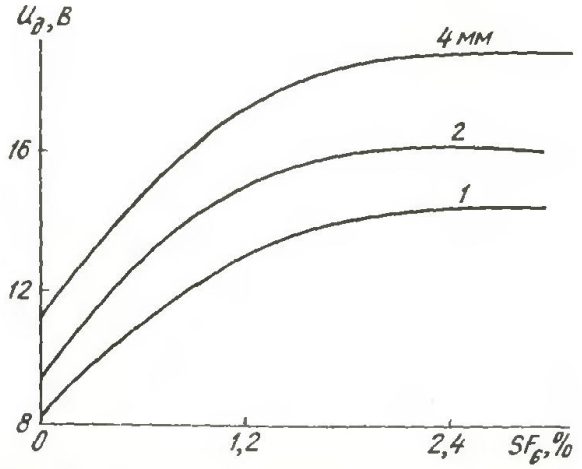


Рис. 34 Зависимость напряжения дуги от содержания SF_6 в защитном газе (аргоне) при изменении межэлектродного расстояния [9].

В последнее время сложилось представление, что изменение основных характеристик дуги и связанное с ним возрастание ее проплавляющей способности при введении в атмосферу дуги соединений галогенов или их паров обусловлено контрагированием дугового разряда [9]. Однако вопрос о природе процесса сжатия дуги остается дискуссионным.

В работе [191] предложена гипотеза для объяснения механизма контрагирования при сварке титана неплавящимся электродом с использованием галогенсодержащего флюса. Исходные экспериментальные факты следующие. Эффект проплавления при сохранении постоянной плотности наносимых флюсов — галогенидов — возрастал с увеличением потенциала ионизации металла, входящего в галогенид, и с увеличением относительной массовой доли галогена в соединении (т. е. с уменьшением атомной массы металла и возрастанием его валентности). В порядке увеличения эффекта проплавления галогены располагались в следующем порядке: фтор, бром, хлор. Предполагается, что галогены, попадая в

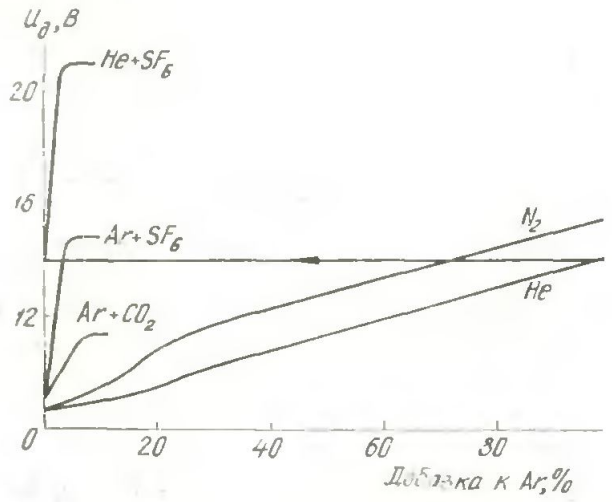


Рис. 35. Зависимость напряжения дуги от вида и количества газообразных добавок к аргону [9]

зону дугового разряда, могут находиться в четырех состояниях: в виде нейтральных атомов, молекул, положительных и отрицательных ионов. Состояние молекул галогенида в плазме дуги не рассматривалось как не вносящее принципиальных изменений в итоговую картину. По оси дугового разряда, где преобладают электроны с большими энергиями, наиболее вероятным является нейтральное атомное состояние галогена с ничтожным количество положительно заряженных ионов в силу высокого значения потенциалов ионизации фтора, хлора и брома. Авторы работы [191] полагают, что в этой области очень мала также вероятность образования отрицательных ионов, объясняя это малой величиной эффективного сечения процесса захвата электрона атомом. Предполагается также, что отрицательные ионы образуются в результате захвата электрона молекулой галогена и происходит этот процесс на периферии столба дуги после предварительной молизации галогена, обусловленной снижением температуры по радиусу столба дуги. Приняв температуру молизации для фтора 1300 К, для брома 1800 К и для хлора 2080 К, при которой в молекулы объединено 50 % частиц названных газов, авторы работы [191] обнаружили, что по степени влияния на сжатие столба дуги галогены должны располагаться в том же порядке, в каком он был выявлен экспериментально: фтор, бром, хлор. Появление отрицательных ионов на периферии столба приводит к снижению количества электронов, т. е. уменьшению проводимости в этой зоне, что и вызывает эффект сжатия разряда.

Следует, однако, отметить, что предположенная гипотеза недостаточно обоснована экспериментально. Приняв точку зрения авторов, трудно понять, например, каким образом фториды вообще могут оказывать какое-либо действие на дуговой разряд, поскольку при температуре молизации фтора 1300 К не приходится говорить о свободных электронах, необходимых для образования отрицательных ионов, в таком практически холодном газе.

Известны и другие объяснения эффекта сжатия столба дугового разряда при сварке по слою флюса — галогенида. Предполагается [113], что влияние флюса заключается в контрагировании столба и анодного пятна дуги в результате экранирования флюсом металла вокруг сварочной ванны, повышения теплопроводности газа вокруг столба дуги, деионизации периферийных участков дуги в прианодной области, захвате электронов молекулярными фторсодержащими продуктами взаимодействия металла и флюса.

В работе [141] обоснована возможность существования в атмосфере дуги молекулярных фторсодержащих соединений SiF_4, TiF_4 и др., подтвержденная затем экспериментально [175]. Поэтому в некоторых работах в качестве одной из причин контрагирования столба дуги допускалось повышение теплопроводности защитного газа при сварке титана из-за диссоциации молекул группы TiF_n, образующихся при взаимодействии флюса с титаном [53, 55]. Но контрагирование наблюдалось и в экспериментах по изучению режима горения дуги в смеси Ar + + SF_6 [9] с водоохлаждаемым медным анодом, т. е. при отсутствии сварочной ванны и когда возможность образования продуктов взаимодействия SF_6 с материалом анода сведена до минимума. Это позволило авторам [9] сделать вывод, что в этих условиях контрагирование дуги обусловлено свойствами SF_6. Однако, несмотря на то что теплопроводность SF_6 вследствие затрат энергии на диссоциа-

цию молекул значительно превышает теплопроводность аргона, едва ли этот процесс играет в данном случае значительную роль. Действительно, если бы изменение характеристик дуги определялось только повышением теплопроводности среды за счет молекулярной составляющей, то оно усиливалось бы по мере увеличения содержания SF_6 в защитном газе. В то же время изменение характеристик дуги наблюдалось при небольших добавках SF_6 [9], а при введении азота в аргон такое изменение происходит непрерывно вплоть до 100 % N_2 (рис. 35).

Такой же вывод можно сделать и из факта, что на дугу оказывают влияние не только галогенсодержащие флюсы и газы, но и электроотрицательные элементы, содержащиеся в качестве примесей в основном металле [185].

В работе [185] при сопоставлении спектрограмм дуги с характером изменения размеров столба и глубины проплавления основного металла сделано предположение, что наблюдавшиеся различия в проплавляющей способности дуги при сварке сталей неплавящимся электродом в аргоне определяются содержанием серы и кислорода в сварочной ванне. По мнению авторов [185], влияние электроотрицательных элементов, к числу которых могут быть отнесены сера и кислород, на проплавляющую способность дуги обусловлено взаимодействием плазменных потоков дуги, физико-химическими процессами в ванне и на ее поверхности.

Можно сделать следующие выводы.

1. Механизм влияния электроотрицательных элементов сложен и не имеет однозначного объяснения.

2. Образование отрицательных ионов происходит преимущественно при малых энергиях электронов и является термодинамически выгодным процессом.

3. Электроотрицательные элементы и соединения могут существенно влиять на характер горения дуги: вызывать сжатие активного пятна на поверхности электрода, сжимать столб дуги, перераспределять падение напряжения в столбе и приэлектродных областях, нарушать стабильность горения дуги, снижать надежность повторного зажигания дуги при сварке переменным током, изменять глубину проплавления металла и коэффициент формы шва.

4. Механизм изменения основных характеристик дуги и возрастание ее проплавляющей способности при введении соединений галогенов или других электроотрицательных веществ в атмосферу дуги требуют дальнейшего изучения.

Ниже приведены результаты исследования образования отрицательных ионов при нагреве фторсодержащих шлаков и некоторых распространенных составляющих сварочных материалов методом эффузионной ячейки. На основе уравнения Пуассона проанализировано также влияние отрицательных ионов на параметры приэлектродных областей дуги.

Исследование отрицательных ионов, образующихся при нагреве фторсодержащих шлаков, смесей флюорита с оксидами титана и кремния, выполнялось на масс-спектрометрической установке, описанной выше. Изучаемые шлаки, состав которых (%) приведен ниже, получены при сварке электродами с фтористокальциевым покрытием (опытные варианты):

Шлак	SiO_2	CaO	CaF_2	TiO_2	Fe_2O_3	MnO_2	K_2O	Na_2O	MgO
1	20,1	23,7	8,0	20,8	23,0	2,18	0,42	1,48	0,18
2	20,4	25,6	25,7	4,15	3,2	4,4	2,4	3,2	—

Для приготовления шлаков систем $CaF_2 + TiO_2$ и $CaF_2 + SiO_2$ (компоненты брались в количествах, пропорциональных их молекулярным массам) использовались рутиловый концентрат и чистый кварцевый песок, а также химически чистый фтористый кальций с 0,02 % Cl.

Исследуемый образец помещали в углубление специально изготовленной танталовой подложки, закрываемой крышкой с диафрагмой. Площадь углубления 4 × 3 × 1 мм, диафрагмы — 1 мм^2.

Подложка с образцом находилась под потенциалом — 50 В по отношению к входной диафрагме датчика масс-спектрометра МХ-7301. Количественные изме-

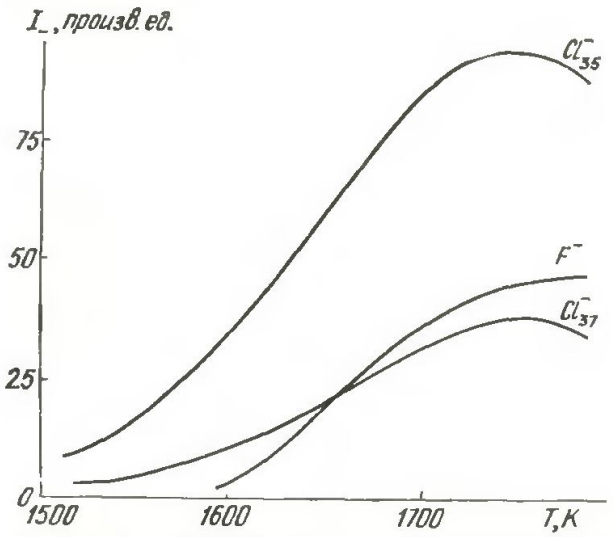


Рис. 36. Зависимость тока отрицательных ионов, образующихся при нагревании CaF_2, от температуры.

рения проводились по методике, изложенной выше.

Масс-спектр отрицательных ионов, наблюдавшихся при нагреве шлаков, состоял из ионов $^{35}Cl^-$, $^{37}Cl^-$, F^- и O^-. Подавляющую часть потока отрицательных ионов в исследованном диапазоне температур (до 1700 К) составляли ионы примеси $^{35}Cl^-$ и $^{37}Cl^-$.

Образованием ионов $^{35}Cl^-$ и $^{37}Cl^-$ сопровождался нагрев и CaF_2. Несмотря на малое содержание в CaF_2 примеси хлора, в исследованном диапазоне температур (до 1800 К) преобладали ионы $^{35}Cl^-$ и $^{37}Cl^-$. Ионы F^- начинали заметно проявляться лишь при достижении температуры 1600 К, в то время как ионы $^{35}Cl^-$ регистрировались при температуре примерно на 100 К ниже (рис. 36). После превышения $T \approx 1700$ К количество отрицательных ионов хлора уменьшалось, по-видимому, в результате истощения примеси, а число ионов фтора продолжало увеличиваться.

Гораздо богаче масс-спектр отрицательных ионов, образующихся при нагреве смеси флюорита с рутилом. При температуре около 1470 К начинали регистрироваться ионы TiF_3^- и TiF_4^-. По мере повышения температуры помимо них стали появляться ионы TiF_2^-, TiF^-, HF^-, F^-, H^- (рис. 37, *а*). При $T \approx 1650$ К регистрировались малоинтенсивные пики, соответствующие ионам CO^-, CaF^- и TiO^-.

В масс-спектре преобладали ионы TiF_3^- и TiF_4^-, причем их соотношение изменялось в зависимости от температуры подложки и времени выдержки образца при данной температуре. Плотность тока ионов TiF_4^- в некоторые моменты превышала плотность тока ионов TiF_3^-.

При температурах выше 1700 К значительным становился пик, соответствующий ионам H^-, и по мере испарения исследуемого образца этот пик становился

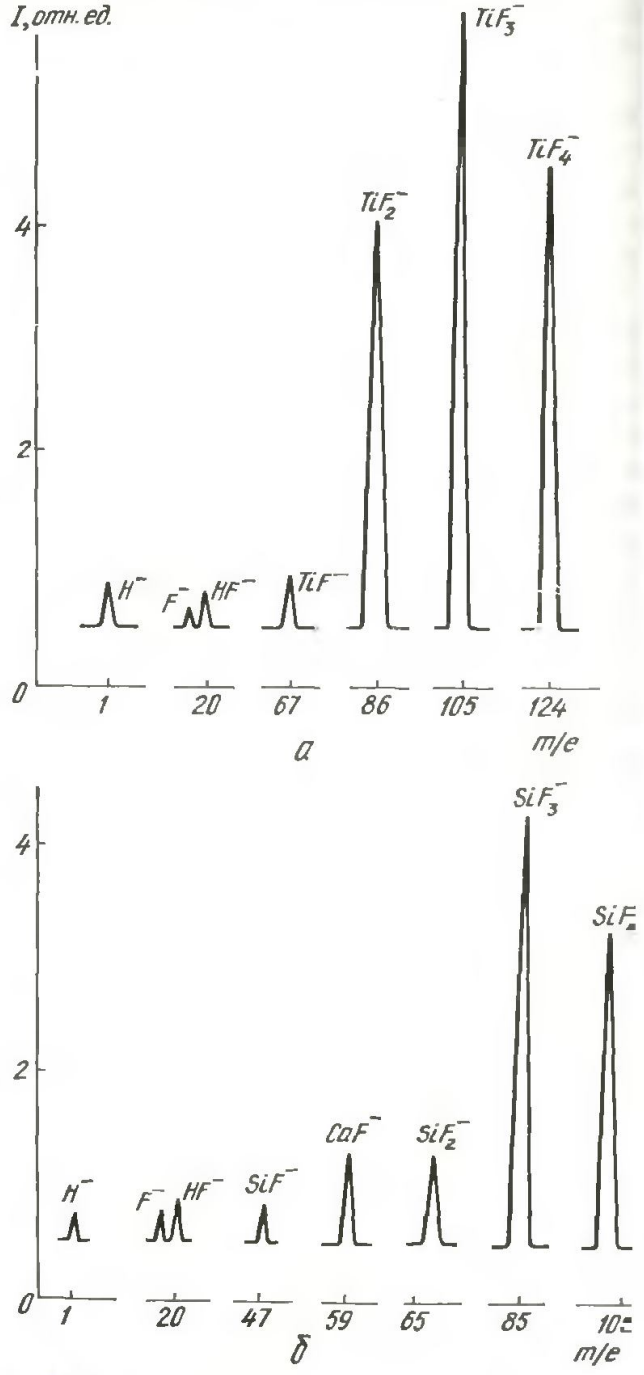


Рис. 37. Масс-спектр отрицательных ионов, образующихся при нагреве ($T = 1500$ К):
а — смеси флюорита и диоксида титана; *б* — смеси флюорита и диоксида кремния.

преобладающим. При нагреве смеси $CaF_2 + SiO_2$ масс-спектр отрицательных ионов состоял из SiF_3^-, SiF_4^-, SiF_2^-, SiF^-, CaF^-, HF^-, F^-, H^- (рис. 37, *б*). До $T \approx$ ≈ 1600 К в масс-спектре преобладали ионы SiF_3^- и SiF_4^-. Отношение их токов при температуре, например, 1500 К составило $I_{SiF_3^-} : I_{SiF_4^-} = 1{,}4$.

С течением времени и по мере повышения температуры плотности токов ионов уменьшались вследствие испарения исследуемой смеси. Остаточная эмиссия отрицательных ионов, по-видимому, обусловлена сохранившимися высокотемпературными окислами, а также поверхностной ионизацией остаточных газов на нагретой подложке.

Один из таких масс-спектров, полученный при $T = 1870$ К, показан на рис. 38. Обращают на себя внимание относительно большие пики, соответствующие ионам H^-, HF^-, SiO^- и SiF^-.

Количественные оценки общей плотности тока отрицательных ионов при 1750 К дали величину порядка 10^{-1} А/м^2 для шлака, $(1...5) \cdot 10^2$ А/м^2 для CaF_2 и $(1...10) \cdot 10^3$ А/м^2 для смесей $CaF_2 + TiO_2$ и $CaF_2 + SiO_2$.

Практически полное отсутствие отрицательных ионов CaF^- при нагреве фтористого кальция свидетельствует о том, что соответствующие им молекулы CaF характеризуются малым сродством к электрону.

В исследованном диапазоне температур степень диссоциации молекул CaF_2 на поверхности подложки незначительна и фтористый кальций испаряется преимущественно в виде молекул CaF_2 [229]. Ионы F^- могут образовываться по таким механизмам: $CaF_2 \rightarrow CaF + F$; $F + e \rightarrow$ $\rightarrow F^-$; $CaF_2 + e \rightarrow CaF + F^-$.

Интенсивное образование отрицательных ионов хлора, наблюдавшееся при нагреве шлаков и фтористого кальция, свидетельствует о том, что даже небольшие примеси хлора в сварочных материалах могут быть эффективным источником отрицательных ионов.

В полученных масс-спектрах отсутствовали молекулярные ионы F_2^- и Cl_2^-, что указывает на неправомерность предложенного в работе [191] механизма

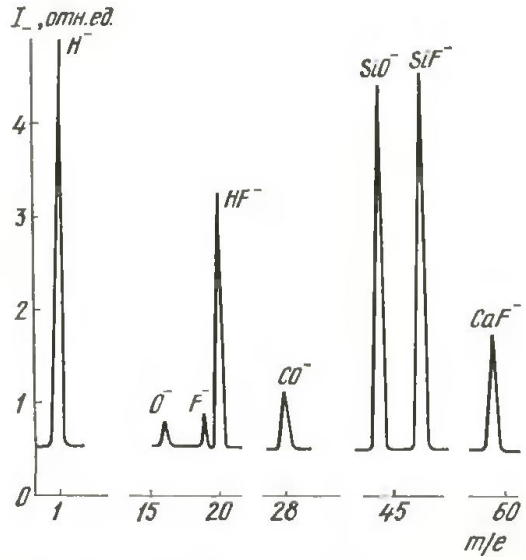


Рис. 38. Остаточный масс-спектр отрицательных ионов после испарения основной части массы образца ($T = 1870$ К).

влияния галогенов на дуговой разряд при сварке титана под флюсом.

Важную роль в образовании отрицательных ионов в атмосфере дугового разряда, как видно из полученных результатов, играют химические реакции, которые протекают между компонентами сварочных материалов и приводят к образованию молекул, имеющих большое сродство к электрону.

Введение в состав фторсодержащих сварочных материалов таких соединений, как SiO_2 и TiO_2, вступающих в реакции с фторидами [141], значительно увеличивает выход отрицательных ионов, причем в основном они являются молекулярными.

Большие количества отрицательных ионов HF^- и H^-, регистрировавшиеся в ходе экспериментов при высоких температурах, позволяют сделать предположение об эффективности механизма поверхностной ионизации HF и H, что находится в согласии с результатами работы [43].

Полученные данные позволяют оценить влияние отрицательных ионов на напряженность электрического поля в приэлектродных областях дугового разряда. Поскольку в настоящее время отсутствует теория дугового разряда, которая описывает совокупность явлений в столбе дуги и приэлектродных областях, для оценки величины напряженности поля

у катода воспользуемся известным уравнением Маккоуна [279]

$$E_к^2 = 16\pi \sqrt{U_к}\,(j_i + \sqrt{m_i/2e} - j_e \sqrt{m_e/2e}), \quad (1.23)$$

где $U_к$ — катодное падение потенциала.

При выводе уравнения (1.23) предполагалось, что электрическое поле у катода создается совместным действием положительных ионов и электронов и определяется, согласно уравнению Пуассона, как

$$\operatorname{div} E = 4\pi e\,(n_{i+} - n_e). \quad (1.24)$$

Поскольку поддержание заданной концентрации зарядов требует различных значений соответствующих плотностей тока в зависимости от подвижностей носителей зарядов, можно ожидать, что учет наличия отрицательных ионов отразится на величине напряженности электрического поля в катодной области $E_к$.

Выясним изменения, вносимые в это уравнение появлением отрицательных ионов в катодной области. Решением уравнения (1.24) в этом случае будет

$$E_{к1}^2 = \sqrt{\frac{U_к}{2e}} \sqrt{m_{i+}} j_{i+} \left(1 - \frac{j_e}{j_{i+}} \times \right.$$

$$\left. \times \sqrt{\frac{m_e}{m_{i+}}} - \frac{j_{i-}}{j_{i+}} \sqrt{\frac{m_{i-}}{m_{i+}}}\right). \quad (1.25)$$

Введем обозначение $G = \frac{j_e}{j_{i+}} \sqrt{m_e/m_{i+}}$. Тогда уравнения напряженности электрического поля в катодной области $E_{к1}$ (при наличии отрицательных ионов) и $E_к$ (в отсутствие отрицательных ионов) примут вид

$$E_{к0}^2 = 16\pi \sqrt{U_к/2e} \sqrt{m_{i+}} j_{i+} (1 - G); \quad (1.26)$$

$$E_{к1}^2 = 16\pi \sqrt{U_к/2e} \times$$

$$\times \sqrt{m_{i+}} \left[1 - G\left(1 + \frac{j_{i-}}{j_e} \sqrt{\frac{m_{i-}}{m_e}}\right)\right]. \quad (1.27)$$

Чтобы избежать введения допущений относительно значений $U_к$ и j_{i+}, характер изменения напряженности поля удобнее анализировать, рассматривая отношение $E_{к1}$ и $E_{к0}$:

$$E_{к1}^2/E_{к0}^2 = 1 - \frac{\frac{j_{i-}}{j_{i+}} \sqrt{m_{i-}/m_{i+}}}{1 - G}. \quad (1.28)$$

Из соотношения (1.28) следует, что при всех значениях $G < 1$ напряженность электрического поля в катодной области уменьшается по мере увеличения в ней количества отрицательных ионов.

Значения параметра G в уравнении (1.28) вносят заметный вклад в отношение $E_{к1}/E_{к0}$ при неизменном значении j_{i-}/j_{i+} лишь при $j_e/j_{i+} > 30$ и если ток положительных ионов переносится ионами железа. В последнем случае $\sqrt{m_e/m_{Fe+}} = 3{,}13 \cdot 10^{-3}$, поэтому $G = 0{,}1$ при $j_e/j_{i+} = 31{,}3$. Того же порядка критические значения отношения j_e/j_{i+} будут и для положительных ионов других элементов ввиду близости значений $\sqrt{m_{i+}}$ разных ионов. Зависимость параметра G от отношения j_e/j_{i+} приведена на рис. 39

Введем, например, зависимости, характеризующие изменение отношения $E_{к1}/E_{к0}$ в случае, когда положительные ионы представлены ионами Fe^+, а отрицательные — ионами F^- и SiF_3^- (рис. 40). Видно, что появление в катодной области отрицательных ионов может приводить к уменьшению здесь напряженности электрического поля. Но для заметного его ослабления необходимы большие количества отрицательных ионов. Снижение $E_к$, в свою очередь, вызовет уменьшение катодного падения потенциала. Но поскольку при снижении $U_к$ может уменьшиться плотность тока с катода, а необходимое значение ее ограничивается условиями поддержания дуги, надо увеличить напряжение источника питания, подводимое к межэлектродному промежутку Иными словами, уменьшение напряженности электрического поля в катодной области $E_{к1}$, обусловленное присутствием отрицательных ионов, вызывает необходимость повышения номинального напряжения на дуге.

Если электрическое поле в анодной области создается объемным зарядом только электронов, то оно описывается

уравнением [97]

$$dE/dx = 4\pi e n_e. \qquad (1.29)$$

Учтем, как и выше, возможность появления отрицательных ионов. При наличии их уравнение (1.29) принимает вид

$$dE/dx = 4\pi e (n_e + n_{i-}). \qquad (1.30)$$

Пусть на границе столба с анодной областью плотности токов электронов и отрицательных ионов составляют соответственно j_e и j_{i-}, а падение напряжения на расстоянии x равно U. Поскольку $j_e = n_e e v_e$, $j_{i-} = n_{i-} e v_i$, где v_e и v_i — скорости направленного движения соответственно электрона и отрицательного иона $v_e = \sqrt{\frac{2e}{m_e}U}$, $v_{i-} = \sqrt{\frac{2e}{m_i}U}$; $U = Ex$, то

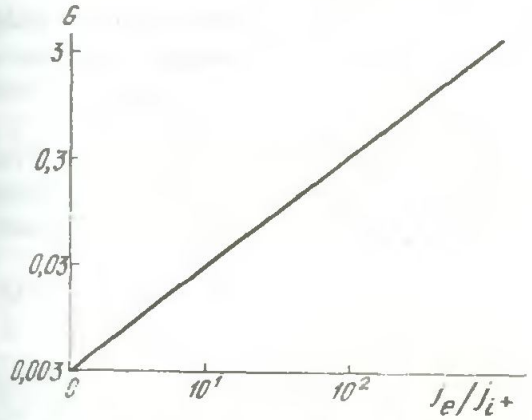


Рис. 39. Зависимость параметра G от соотношения токов электронов и положительных ионов

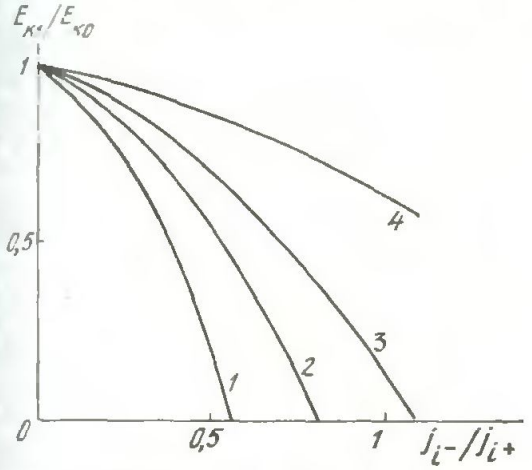


Рис. 40. Зависимость $E_{к1}/E_{к0}$ от соотношения плотностей токов отрицательных и положительных ионов:

1 — ионы SiF_3^-, $j_e/j_{i+} = 100$; *2* — ионы SiF_3^-, отношение j_e/j_{i+} малое; *3* — ионы F^-, $j_e/j_{i+} = 100$; *4* — ионы F^-, отношение j_e/j_{i+} малое.

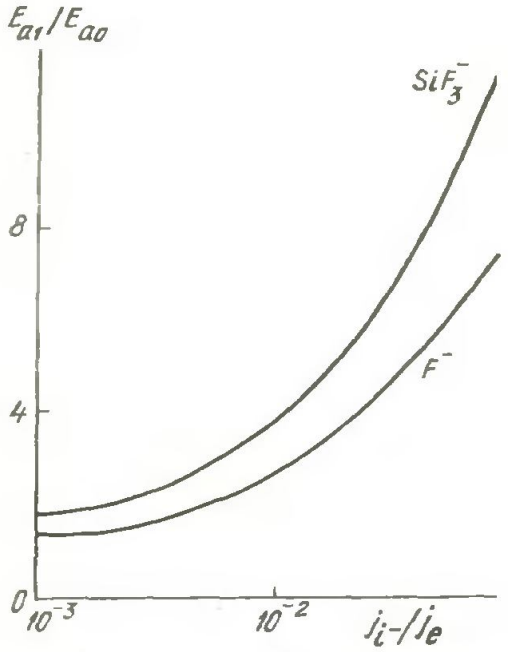


Рис. 41. Зависимость E_{a1}/E_{a0} от соотношения плотностей токов отрицательных ионов и электронов.

$$dE/dx = \frac{4\pi}{\sqrt{2eEx}}(j_e\sqrt{m_e} + j_{i-}\sqrt{m_{i-}}), \qquad (1.31)$$

откуда

$$\sqrt{E}dE = \frac{4\pi}{\sqrt{2e}}\sqrt{\frac{1}{x}}(j_e\sqrt{m_e} + j_{i-}\sqrt{m_{i-}})dx. \qquad (1.32)$$

Последнее выражение легко интегрируется.

Если E_{a0} — напряженность электрического поля, создаваемого объемным зарядом электронов и определяемого уравнением (1.29), а E_{a1} — поле, создаваемое объемным зарядом электронов и отрицательных ионов и определяемое уравнением (1.30), получим

$$E_{a1}/E_{a0} = \sqrt[3]{\left(1 + \frac{j_{i-}}{j_e}\sqrt{m_{i-}/m_e}\right)^2}. \qquad (1.33)$$

Для иллюстрации полученного соотношения рассмотрим два случая. В одном случае объемный заряд создается при участии ионов F^-, в другом — при участии ионов SiF_3^-. Соответственно из уравнения (1.33) следуют выражения

$$E_{a1}/E_{a0} = \sqrt[3]{(1 + 1{,}9 \cdot 10^3 j_{i-}/j_e)^2}; \qquad (1.34)$$

$$E_{a1}/E_{a0} = \sqrt[3]{(1 + 3{,}9 \cdot 10^2 j_{i-}/j_e)^2}. \qquad (1.35)$$

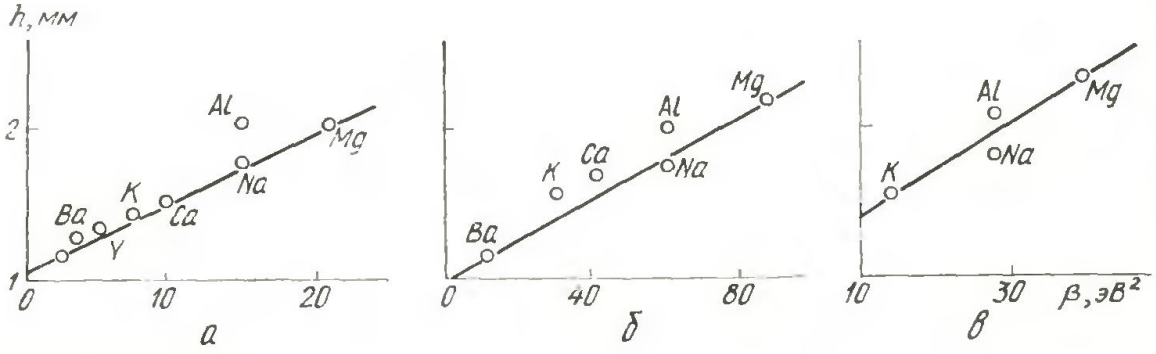


Рис. 42. Глубина проплавления титана при сварке неплавящимся электродом под однокомпонентными флюсами:

а — на основе фторидов; *б* — на основе бромидов; *в* — на основе хлоридов [190, 291] (галогениды указанных металлов использовались в качестве флюсов).

Задавая параметрически значения j_{i-}/j_e, получаем результаты, приведенные на рис. 41. Видно, что появление в анодной области даже малых количеств отрицательных ионов приводит к значительному увеличению напряженности электрического поля и соответственно анодного падения напряжения. Можно полагать, что этим объясняются известные факты большого увеличения суммы приэлектродных падений напряжения при сварке электродами с основным покрытием и под галогенсодержащими флюсами [104, 97].

Повышением анодного падения напряжения в свою очередь можно объяснить известный [190, 55] факт увеличения глубины провара в процессе сварки при прямой полярности под галогенсодержащими флюсами. Детальный анализ этого явления затруднителен из-за отсутствия экспериментальных данных о плотностях токов электронов и отрицательных ионов, а также точного соотношения между U_a и h. Положение усложняется и тем, что в состав флюсов помимо фтора входят элементы, имеющие сравнительно небольшие значения потенциала ионизации. Образование положительных ионов в анодной области оказывает действие, противоположное действию отрицательных ионов.

Тем не менее, исходя из чисто качественных соображений, можно получить соотношение, устанавливающее связь между глубиной провара металла и характеристиками элементов, входящих в состав однокомпонентного флюса. Поскольку значение U_a повышается по мере увеличения j_{i-} и m_{i-}, можно считать, что глубина провара h возрастает по мере увеличения сродства к электрону E_s у галогена, входящего в состав флюса, и его массового числа $M_г$. С другой стороны, увеличение количества положительных ионов (уменьшение потенциала ионизации у металла, входящего в состав флюса) и их массового числа M_{Me} будет оказывать противоположное действие. Поэтому целесообразно ввести параметр, с которым можно сопоставлять величину

$$\beta = AE_s U_{iMe} M_г / M_{Me}, \qquad (1.36)$$

где A — коэффициент, мм/эВ².

Результаты вычисления параметра β и сопоставления с ними величин h, полученных при сварке титана с использованием однокомпонентных фторидных флюсов [190, 291], показаны на рис. 42, где $A = 1$, и подтверждают правильность предложенного механизма влияния электроотрицательных элементов на процессы, протекающие в приэлектродных областях.

Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы.

1. При нагреве смесей фторидов с рутилом и кремнеземом, широко используемых в составе электродных покрытий и других материалов, образуется значительное количество отрицательных ионов, преимущественно молекулярных.

2. Напряженность электрического поля в катодной области дуги при наличии отрицательных ионов уменьшается. Это уменьшение становится заметным лишь при достаточно большой концентрации отрицательных ионов (приближающейся

к концентрации положительных ионов).

3. Напряженность электрического поля в анодной области дуги и анодное падение напряжения под влиянием отрицательных ионов резко возрастают, что вызывает перераспределение напряжения в дуге и увеличивает глубину провара металла в случае сварки при прямой полярности.

4. Плотность тока отрицательных ионов, получаемая при нагреве смесей флюорита с рутилом и кремнеземом до температур, близких к температуре плавления флюорита, достигает значений 10^3—10^4 А/м^2 и, следовательно, оказывает значительное влияние на напряженность электрического поля в приэлектродных областях.

8. Отрицательные ионы в контрагировании столба дугового разряда

Выше проанализированы изменения, вызываемые отрицательными ионами в приэлектродных областях дуги, однако процессы в столбе разряда, приводящие к его контрагированию, не затрагивались.

В общем случае газового разряда контрагирование как один из типов неустойчивости слабоионизованной плазмы заключается в резком уменьшении области, заполненной разрядом. Физически контрагирование всегда связано с неоднородным распределением температуры по сечению разряда, однако механизмы его могут быть различными [38]. Электрическая дуга, горящая при атмосферном давлении, практически всегда контрагирована, поскольку в радиальном направлении температура плазмы столба дуги уменьшается, а это, согласно уравнению Саха, приводит к резкому уменьшению плотности электронов в периферийной области.

Введение в разрядный промежуток электроотрицательных элементов вызывает сильное дополнительное контрагирование дугового разряда. Естественно искать причину этого эффекта в способности указанных элементов легко образовывать отрицательные ионы. В большинстве случаев именно с этим обстоятельством и связывают влияние на дугу

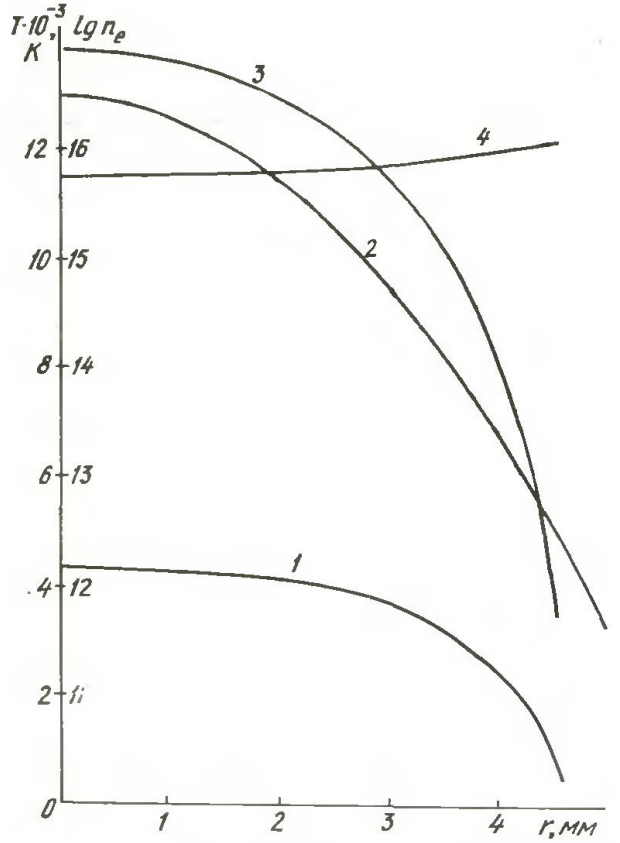


Рис. 43. Радиальное распределение T (r) (2), n_e (r) (3) и n_{F^-} (1) в дуге, горящей в аргоне при добавлении 1 % атомов фтора, имеющих распределение n_F (r) (4)

электроотрицательных элементов, хотя, как уже отмечалось, высказываются и другие предположения.

Анализ, основанный на представлении о существовании в плазме столба дуги локального термодинамического равновесия, позволяет выяснить распределение электроотрицательных элементов в столбе дуги и установить механизм контрагирования.

Предположим, что дуга поддерживается в одноатомном инертном газе (для определенности — в аргоне) при атмосферном давлении, а электрическое поле в столбе однородно и параллельно оси разряда. Из-за неоднородного распределения температуры по сечению столба разряд контрагирован (первично) и имеет форму достаточно длинного цилиндра. Влияние приэлектродных процессов не учитываем.

На рис. 43 приведено радиальное распределение температуры в столбе дуги, горящей в аргоне, рассчитанное по фор-

муле (1.7). Необходимые для расчета величины T_0 и R определены экспериментально в работе [115], где показано, что при токе дуги 100 А, горящей в аргоне между вольфрамовым катодом и водоохлаждаемым медным анодом, рассчитанное и экспериментальное распределения практически совпадают. На этом же рисунке приведено радиальное распределение концентрации свободных электронов, рассчитанное по формуле [38]

$$n_e \approx 1{,}6 \cdot 10^{14} (g_i/g_a)^{1/2} P^{1/2} T^{1/4} \times \\ \times \exp(-5{,}8 \cdot 10^3 U_i/T). \quad (1.37)$$

Соотношение статистических весов ионного и атомного состояния аргона g_i/g_a приведено в работе [97].

Предположим далее, что в разрядный промежуток вводится газообразный фтор, все молекулы которого в столбе дуги диссоциированы, так как при $T > 2000$ К степень диссоциации фтора $\alpha \approx 1$ [192]. Распределение атомов фтора считаем равномерным, а их концентрацию равной 1 % от общего числа частиц в единице объема. Зависимость $n_F(r)$ с учетом влияния температуры также приведена на рис. 43).

Энергетически выгодную реакцию образования отрицательных ионов фтора запишем в виде $F + e \rightleftarrows F^-$. В условиях локального термодинамического равновесия согласно закону действующих масс в каждой малой области столба дуги справедливо соотношение

$$n_F n_e / n_{F^-} = K, \quad (1.38)$$

где n_F, n_e и n_{F^-} — концентрации атомов соответственно фтора, электронов и отрицательных ионов; K — константа равновесия [38]

$$K = \frac{2g_F}{g_{F^-}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-E_s/kT). \quad (1.39)$$

Здесь E_s — сродство к электрону атома фтора.

Поскольку поле сил, в котором движется захваченный электрон отрицательного иона, быстро затухает с расстоянием, число возбужденных состояний отрицательного иона невелико [38]. Поэтому принимаем $g_F/g_{F^-} = 1$, и формула (1.38) с учетом температурной зависимости концентрации атомов фтора приобретает удобный для расчета вид

$$n_{F^-}/n_e = 15{,}2 P_F T^{-3/2} \exp(1{,}16 \cdot 10^4 E_s/T), \quad (1.40)$$

где P_F — парциальное давление атомов фтора, Н/м^2.

Приняв $E_s = 3{,}47$ эВ, $P_F = 10^3$ Па (1 % атмосферного давления) и используя распределение $T(r)$ и $n_e(r)$, получаем радиальное распределение в столбе дуги отрицательных ионов фтора, находящихся в равновесии с электронами, освобождаемыми в результате термической ионизации атомов аргона (см. рис. 43). При этом положительных ионов F^+ можно не учитывать, так как степень ионизации фтора, имеющего высокий потенциал ионизации при рассматриваемых температурах, незначительна. Как видно из рис. 43, радиальное распределение отрицательных ионов фтора имеет выпуклую форму, а возможные концентрации F^- во всех частях столба таковы, что никакого влияния на электропроводность дугового промежутка они оказать не могут даже при существенно более высоких концентрациях атомов фтора и соответственно ионов F^-.

Иная ситуация возникает в том случае, когда температура столба дуги более низкая. На рис. 44 представлены полученные по формуле (1.40) зависимости логарифма отношения n_{F^-}/n_e от температуры равновесной плазмы одноатомного газа, содержащего от 10^{-4} до 30 % атомов фтора. Видимо, что уменьшение температуры приводит к резкому увеличению этого отношения: снижение T в 4 раза (с 1200 до 3000 К) увеличивает его (кривая 3) почти на шесть порядков. В соответствии с такими изменениями отношения n_{F^-}/n_e изменяется и распределение отрицательных ионов при уменьшении температуры плазмы столба дуги.

Используя приведенные в работе [191] расчетные значения температуры дуги, полученные с учетом парциальных давлений различных элементов, вводимых в дугу, горящую в аргоне, построим кривые распределения $T(r)$, $n_e(r)$, $n_F(r)$ и $n_{F^-}(r)$, аналогичные приведенным на рис. 43.

Согласно данным [191], при добавлении

к аргону 20 % паров Ti эффективный потенциал ионизации $U_{i\,эф}$ атмосферы, в которой горит дуга, уменьшился до 7,8 эВ, а температура дуги при токе 120 А равна 7000 К, что намного ни-

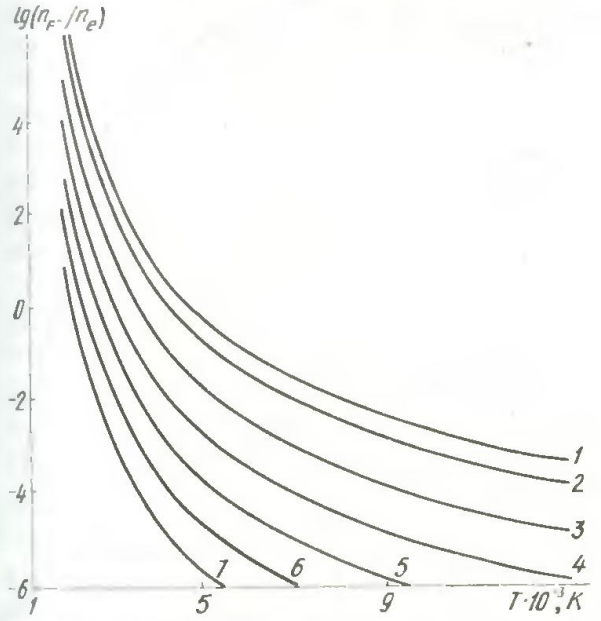


Рис. 44. Зависимость логарифма отношения n_{F^-}/n_e в равновесной плазме от ее температуры с добавкой 30 % (*1*), 10 % (*2*), 1 % (*3*), 0,1 % (*4*), 0,01 % (*5*), 0,001 % (*6*) и 0,0001 % (*7*) атомов фтора при атмосферном давлении.

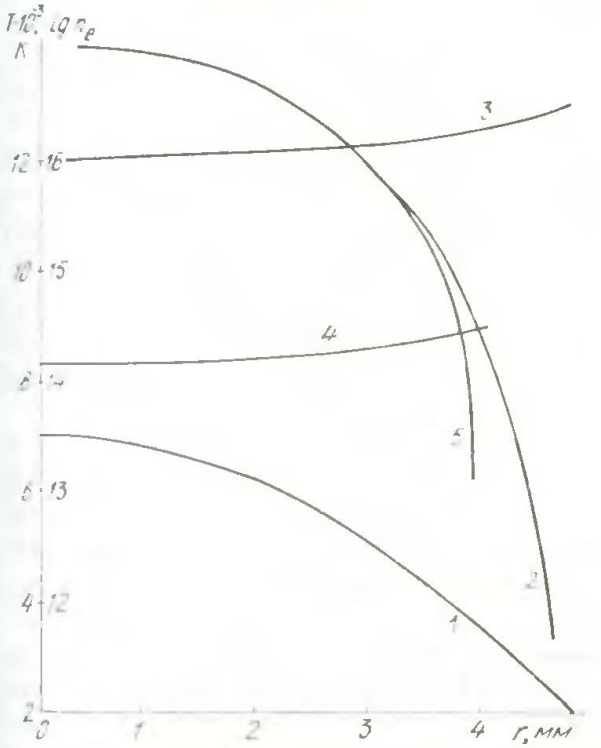


Рис. 45. Распределение T (r) (*1*) и n_e (r) (*2*) в дуге, горящей в атмосфере 80 % Ar и 20 % Ti, а также n_F (r) (*3*), n_{F^-} (r) (*4*) и $(n_e - n_{F^-})$ (r) (*5*) при добавлении 1 % атомов фтора.

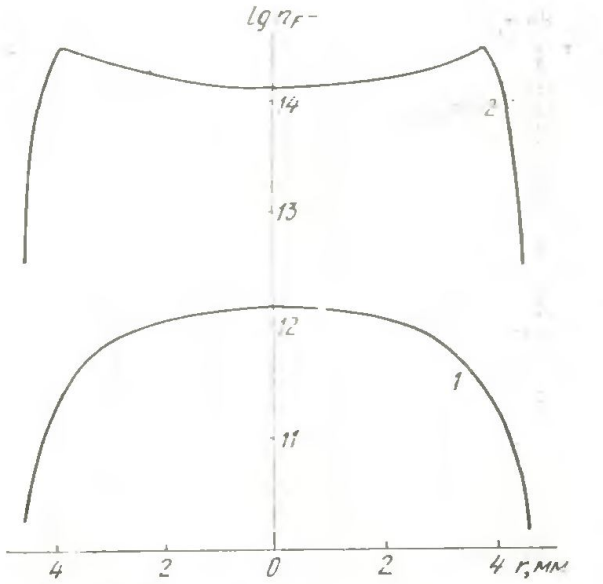


Рис. 46. Изменение радиального распределения F^-, обусловленное снижением температуры плазмы на оси столба дуги с 13 000 К (*1*) до 7000 К (*2*) (в обоих случаях начальные распределения n_e (r) близки и в атмосферу дуги добавляется 1 % атомов фтора).

же измеренной в работе [115] температуры дуги в чистом аргоне при близком значении тока. Рассчитанные по формулам (1.7) и (1.37) распределения T (r), n_e (r), а также распределение n_{F^-} (r), полученное по формуле (1.40), и n_F (r) при условии, что в атмосферу дуги добавляется 1 % атомов фтора, приведены на рис. 45. Видно, что уменьшение температуры по сравнению с чистым Ar (см. рис. 43) практически не изменяет распределение n_e (r), а форма распределения n_{F^-} (r) существенно изменяется. Концентрация отрицательных ионов F^- при одинаковом содержании в обоих случаях атомов фтора увеличивается на два порядка на оси столба и растет в радиальном направлении. На расстоянии $r \approx$ $\approx$ 4 мм она оказывается равной концентрации электронов, освобождаемых в результате термической ионизации атомов в столбе дуги. Это означает, что в этой периферийной области все свободные электроны могут быть захвачены атомами фтора. На этом же рисунке приведено распределение n_e (r), построенное с учетом условия квазинейтральности плазмы. Спад кривой становится более крутым, чем в отсутствие отрицательных ионов. Таким образом, в результате сни-

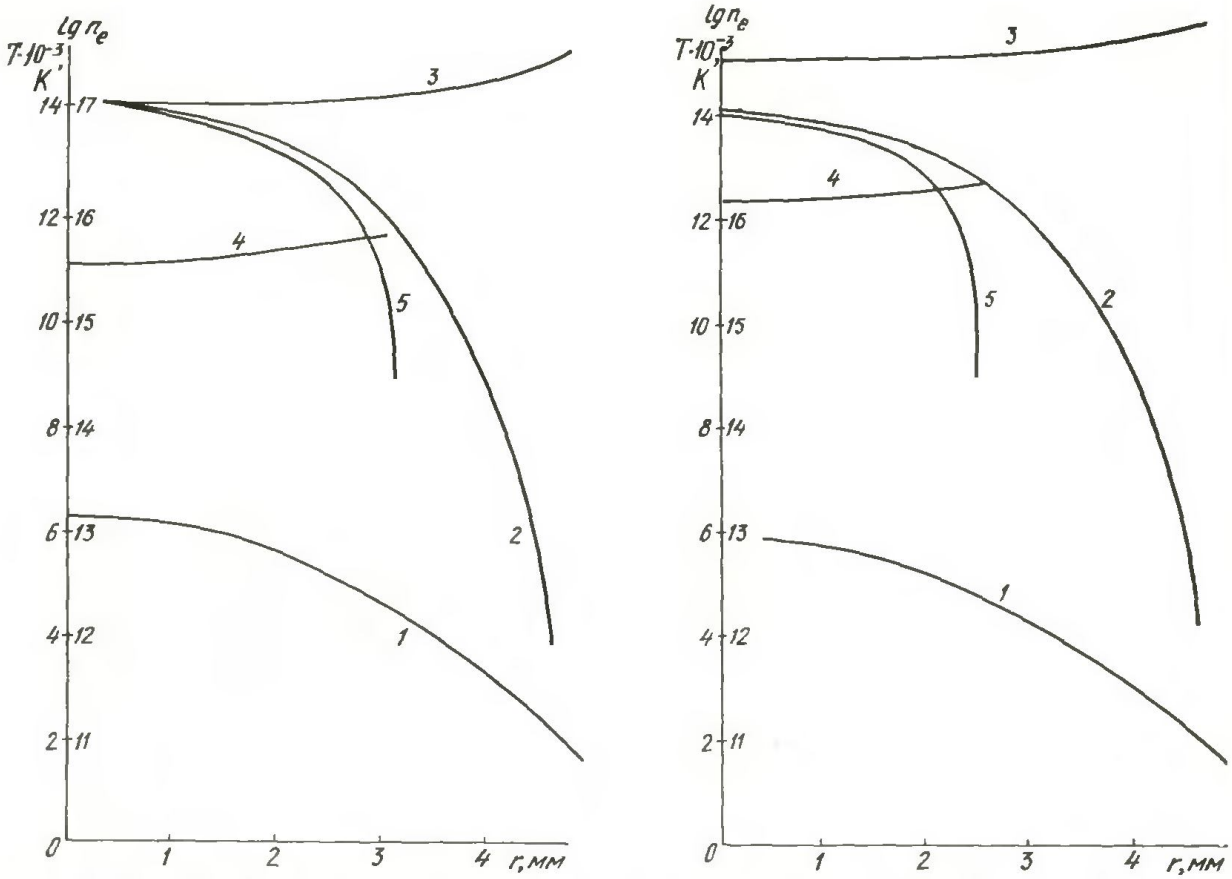


Рис. 47. Радиальные распределения T (r) (1), n_e (r) (2), n_F (r) (3), n_{F^-} (r) (4) и $(n_e - n_{F^-})$ (r) (5) в дуге, горящей в атмосфере 65 % Ar, 20 % Ti, 5 % Ca и 10 % F.

Рис. 48. Радиальные распределения T (r) (1); n_e (r) (2); n_F (r) (3); n_{F^-} (r) (4) и $(n_e - n_{F^-})$ (r) (5) в дуге, горящей в атмосфере 40 % Ar, 20 % Ti, 10 % Al и 30 % F.

жения температуры плазмы столба дуги концентрация отрицательных ионов значительно вырастает на оси столба, форма распределения n_{F^-} (r) из выпуклой трансформируется в двугорбую: периферийная область токопроводящего канала обогащается отрицательными ионами (рис. 46). Это приводит к снижению электропроводности на границе столба, интенсифицируются процессы рекомбинации — разряд начнет контрагировать.

Расчет по формуле (1.40) показывает, что при увеличении концентрации атомов фтора в атмосфере, в которой горит дуга, влияние отрицательных ионов F^- на распределение n_e (r) усиливается. По данным, приведенным в работе [191], температура дуги при токе 120 А и составе атмосферы 65 % Ar, 20 % Ti, 5 % Ca и 10 % F равна 6300 К, а при том же токе и составе атмосферы 40 % Ar, 20 % Ti, 10 % Al и 30 % F — 6000 К. Распределения T (r), n_e (r), n_{F^-} (r) и $(n_e - n_{F^-})$ (r), построенные для этих двух случаев, представлены на рис. 47 и 48. Влияние отрицательных ионов на ход зависимости n_e (r) максимально при наибольшей из использованных в расчетах концентрации атомов фтора.

Условия в периферийной области столба дуги особенно благоприятны для образования отрицательных ионов из молекулярных частиц, которые имеют соответствующей величины сродство к электрону. Эти условия создаются двумя факторами: уменьшением степени диссоциации молекул в радиальном направлении и резонансным характером наиболее эффективного процесса образования отрицательных ионов из молекулярных частиц — диссоциативного захвата. Для некоторых видов молекул, например газо-

образных фторидов, максимальные сечения этого процесса достигаются при минимальных энергиях электронов [109].

Поскольку снижение температуры плазмы по мере удаления от оси разряда приводит к резкому падению концентрации свободных электронов, то зависящая от нее концентрация отрицательных ионов, образующихся как из атомных, так и из молекулярных частиц, также резко уменьшается. Поэтому в обоих случаях форма радиального распределения отрицательных ионов будет двугорбой, аналогичной представленной на рис. 46. Результаты анализа температурной зависимости отношения n_{F^-}/n_e, радиальных распределений в столбе дуги электронов отрицательных ионов, а также зависимости логарифма величины $n_F/_{-}n_e$ от концентрации исходных электроотрицательных атомов (рис. 49) позволяют ответить на вопрос, почему контрагирование, обусловленное отрицательными ионами, не растет непрерывно с увеличением концентрации частиц, из которых образуются отрицательные ионы, в отличие, например, от контрагирования, связанного с отводом энергии от столба из-за ее затрат на диссоциацию молекул [10].

Представленные на рис. 45, 47 и 48 зависимости показывают, что повышение концентрации атомов фтора n_F приводит к увеличению количества отрицательных ионов в столбе дуги и на его периферии. Поэтому влияние концентрации этих частиц на контрагирование, казалось бы, должно расти непрерывно. Однако, как видно из рис. 49, величина n_{F^-}/n_e изменяется наиболее резко именно при малых добавках (до 1 %) неитральных атомов и с уменьшением температуры такое влияние усиливается. Дальнейший рост концентрации n_F (выше 1 %) влияет на величину n_{F^-} значительно слабее. Кроме того, если рассмотреть кинетику процесса контрагирования, можно обнаружить следующее. В результате контрагирования сечение столба дуги уменьшается. Это приводит к тому, что пропускание прежнего тока станет возможным только при повышении степени ионизации плазмы, т. е. должна увеличиться температура дуги. Повышение температуры

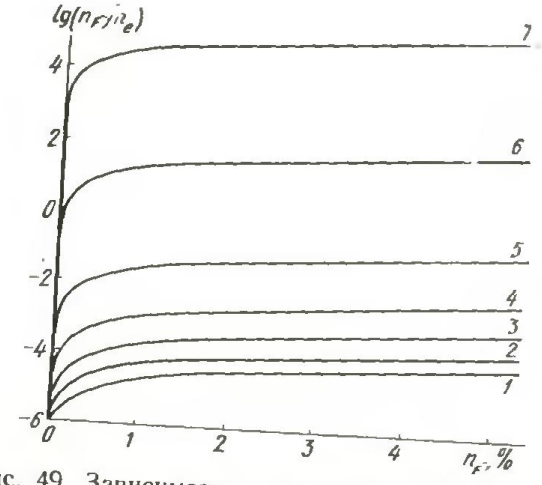


Рис. 49. Зависимость логарифма отношения n_{F^-}/n_e в равновесной плазме от концентрации атомов фтора при 13 000 К (*1*), 11 000 К (*2*), 9000 К (*3*), 7000 К (*4*), 5000 К (*5*), 3000 К (*6*) и 2000 К (*7*).

уменьшает отношение n_{F^-}/n_e и абсолютную величину n_{F^-}, поэтому снижается влияние отрицательных ионов на электропроводность. При этом, как видно из рис. 44 и 49, зависимость отношения n_{F^-}/n_e от температуры значительно сильнее, чем от исходной концентрации электроотрицательных атомов: изменение n_{F^-}/n_e на несколько порядков происходит при изменении температуры только в несколько раз и поэтому никакими изменениями концентрации электроотрицательных атомов не может быть компенсировано. Если отрицательные ионы образуются только из молекулярных частиц, то и в этом случае контрагирование будет ограничено определенным уровнем концентрации молекул: повышение градиента температуры на периферии столба в результате его контрагирования усилит процессы диссоциации исходных электроотрицательных молекул, и выход отрицательных ионов не будет расти с увеличением концентрации исходных частиц.

Можно также сделать некоторые выводы о влиянии отрицательных ионов на процессы в столбе дуги переменного тока. Помимо рассмотренного выше контрагирования столба особенно сильное влияние эти ионы могут оказать на параметры дуги в переходный момент, когда темпе-

ратура плазмы понижена и тем самым созданы благоприятные условия для образования в ней отрицательных ионов. Увеличение соотношения n_F/n_e препятствует восстановлению электропроводности столба, необходимой для повторного зажигания дуги. При этом чем ниже максимальная температура столба и соответственно ниже температура плазмы в переходный момент, тем сильнее влияние отрицательных ионов. Известно [97], что введение в дуговой разряд легкоионизируемых элементов уменьшает температуру дуги, поэтому при совместном использовании в составе материалов для сварки переменным напряжением легкоионизируемых и электроотрицательных элементов неблагоприятное действие последних будет усиливаться.

Реальный выход из этого положения (если соединения электроотрицательных элементов необходимы для улучшения металлургических характеристик сварочного процесса) заключается в выведении указанных соединений на максимально возможное расстояние от столба дуги. Достигается это двухслойной конструкцией электродного покрытия, в внешний слой которого вводят соединения, неблагоприятно влияющие на параметры дугового разряда.

Таким образом, введение в разрядный промежуток электроотрицательных элементов является эффективным способом управления технологическими характеристиками дуги как изменением параметров, так и в результате контрагирования столба дуги.

Глава вторая

СТАБИЛЬНОСТЬ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

1. Методы и критерии оценки

Стабильность горения электрической дуги Для того чтобы дуга могла использоваться для сварки металлов, она должна иметь необходимые энергетические характеристики и достаточную устойчивость горения. Под термином «устойчивость» обычно понимается способность дуги к продолжительному горению после ее зажигания [130]. Режим горения дуги, который может существовать в течение неограниченного времени в отсутствие возмущений и характеризуется каким-либо отличительным признаком, называется равновесным [67]. Если отклонение режима от исходного равновесия под действием возмущений в течение интересующего нас времени не превышает допустимого значения, то равновесный режим считается устойчивым по отношению к данным возмущениям [67].

При анализе устойчивости обычно удовлетворяются знанием лишь интегральных величин, таких, например, как напряжение и ток дуги, определяющих ее энергетическое состояние, и аналогичных величин, определяющих ее пространственное положение, форму и движение (длина, диаметр, скорость перемещения) [67]. Соответственно при этом говорят об энергетической или пространственной устойчивости.

Устойчивость дуги определяется одним или двумя условиями: способностью внешней цепи поддерживать напряжение, необходимое для горения разряда, и способностью эмиссионных процессов, обеспечивающих ток на катоде дуги, протекать в условиях ограниченного тока, величина которого определяется параметрами цепи [133]. Для дуг в любых средах, кроме вакуума, важны оба эти условия [182].

В дуге полное падение напряжения на разряде может стать большим и достичь величины напряжения внешней цепи. Тогда условие устойчивости ее горения не будет выполняться, и разряд должен погаснуть.

Процессы в дуге можно в определенной мере стабилизировать (повысить устойчивость горения дуги и уменьшить разбрызгивание металла) соответствующим выбором электрических параметров источников тока и сварочной цепи, что достигается установлением определенной формы вольт-амперной характеристики источника тока и его динамических свойств. Возможности такой стабилизации подробно исследованы Б. Е. Патоном [130], В. П. Никитиным [123], И. Я. Рабиновичем [177], В. К. Лебедевым и М. Н. Сидоренко [91], Б. Е. Патоном и В. К. Лебедевым [133], И. И. Зарубой [57], А. Г. Потапьевским [147], Д. Б. Кейта [266] и др. Этот способ можно назвать внешним способом регулирования технологических свойств дуги. Другой способ заключается в активном воздействии на процессы сварки в самой дуге введением в дугу различных веществ, которые можно разделить на три группы: легкоионизируемые (в первую очередь щелочные), электроотрицательные и элементы, повышающие эмиссионную способность электродов.

Возможности этого способа исследовались в работах Г. М. Тиходеева [197], К. К. Хренова [209], В. И. Дятлова и

И. И. Фрумина [46], Д. М. Рабкина и Б. И. Медовара [180], Б. Е. Патона [129], И. В. Кирдо [71, 73], Г. И. Лескова [96], Б. Е. Патона и Т. М. Слуцкой [134], И. К. Походни [174], Б. Е. Патона и Н. М. Воропая [131], В. С. Гвоздецкого [32], А. Г. Мазеля [103], С. М. Гуревича и В. Н. Замкова [55], Б. Н. Бадьянова [10], В. С. Мечева [114], Г. Е. Вайншенка [319], А. Лесневича [277], Б. М. Пашетта [291] и других советских и зарубежных исследователей.

Вопрос о продолжительности существования разряда определяется в основном природой эмиссионных процессов на катоде дуги и в настоящее время полностью еще не выяснен. На практике чаще всего приходится иметь дело с динамически равновесными состояниями дуг. В литературе по сварочным дугам, где речь идет о влиянии на дугу различных материалов и условий сварки безотносительно к характеристикам источников питания, для обозначения такого состояния часто используются термины «стабильное горение дуги» и «стабильность».

В случае сварочной дуги существует множество возмущающих факторов: колебания напряжения, определяемые источником питания, непрерывное перемещение дуги на новые участки свариваемого изделия, плавление и перенос металла, чередование полярности переменного тока, неравномерность и неоднородность потока частиц, поступающих в межэлектродный промежуток, и т. д.

Плавление и перенос металла через столб являются, по мнению авторов работы [57], причиной нарушения устойчивости процесса сварки, а короткие замыкания — причиной разбрызгивания электродного металла [147].

Наличие оксидных и других пленок на катоде может как повышать, так и понижать устойчивость горения дуги [197, 104].

Наличие легкоионизируемых элементов в атмосфере дугового разряда стабилизирует положение катодного пятна и изменяет характер разряда, позволяя при достаточной их концентрации получать диффузионную привязку разряда на катоде, что существенно влияет на характер плавления и переноса электродного металла [97].

Первые попытки объяснить механизм действия легкоионизируемых добавок на стабильность дуги и перенос электродного металла предпринимались еще в 1936—1938 гг. По мнению П. П. Буштедта [24], а также авторов более поздних работ [71], положительное влияние стабилизирующих веществ вызвано усилением электронной эмиссии на катоде вследствие уменьшения работы выхода электронов. Согласно другой гипотезе, разработанной К. К. Хреновым [209] и Г. И. Лесковым [97], действие стабилизирующих элементов на устойчивость дуги обусловлено испарением используемого вещества, диссоциацией продуктов испарения в дуге и термической ионизацией газов и металлических паров. Такое действие обусловлено тем, что атомы щелочных элементов при нахождении их в межэлектродном промежутке благодаря большим сечениям столкновений с электронами [109] раньше остальных воспринимают энергию электрического поля, получаемую от электронов при столкновениях с ними. Как отмечал И. В. Кирдо [73], повышение стабильности дуги переменного тока возможно путем воздействия на каждый из двух процессов, определяющих ход повторного зажигания дуги,— на процесс ионизации в объеме газа и на величину остаточной термоэлектронной эмиссии. На увеличение длительности существования остаточной проводимости межэлектродного промежутка, являющейся характеристикой устойчивости дуги, как в результате введения в ее столб паров легкоионизируемых элементов, так и при повышении эмиссионной способности катода, указывалось и Г. И. Лесковым [96]. Поэтому представляется, что при отсутствии достаточных экспериментальных данных обе гипотезы не следует противопоставлять одну другой. Вероятнее всего, обе гипотезы излагают различные проявления одного и того же процесса поддержания горения дуги и в разной мере оказывают влияние в зависимости от конкретных условий.

Особенно заметную роль эмиссионная способность катода в сочетании с присутствием атомов щелочных элементов в атмосфере межэлектродного промежутка

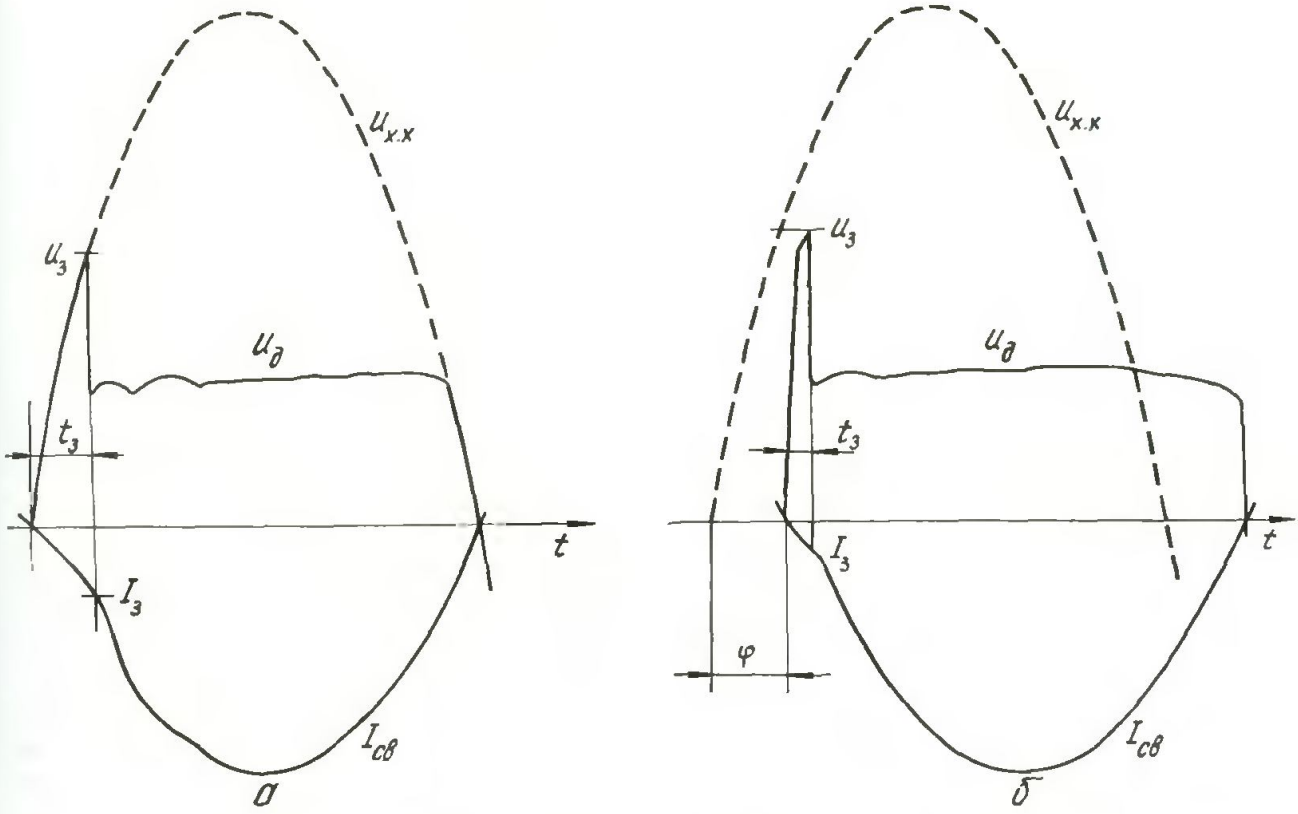


Рис. 50. Изменение параметров дуги переменного тока:

а — без индуктивности в цепи; б — с индуктивностью.

может играть в дуге переменного тока, стабильность горения которой определяется характером изменения электрических параметров межэлектродного промежутка от момента перехода тока через нуль до момента зажигания, их величиной и воспроизводимостью в каждом полупериоде [97].

Несмотря на относительно большое число работ, касающихся стабильности дуги, имеется еще много положений, требующих дополнительного изучения и уточнения, особенно при использовании многокомпонентных сварочных материалов.

Стабильность дуги переменного тока. Зажигание дуги происходит в каждом новом полупериоде после перехода тока через нуль, когда напряжение на электродах достигает некоторого критического значения — напряжения зажигания $U_з$ (рис. 50). Ток в межэлектродном промежутке в момент зажигания $I_з$ резко возрастает до величины тока дуги $I_д$, а напряжение падает до $U_д$. На протяжении остальной части полупериода напряжение дуги остается почти постоянным, а ток непрерывно растет, что влечет за собой изменение размеров столба дуги и его температуры, интенсивности газовых потоков в дуге, размера активных пятен и их температуры. К концу полупериода напряжение и ток, приближаясь к нулевому значению, снижаются настолько, что дуга гаснет. Остаточная плазма в межэлектродном промежутке начинает интенсивно остывать, что сопровождается снижением ее проводимости, которое наблюдается некоторое время и после перехода тока через нуль. На рис. 51 представлены данные И. В. Кирдо [73] о проводимости дугового промежутка, полученные им методом зондирования. В дальнейшем подвод энергии увеличивается, плазма разогревается, возрастает ее проводимость. При определенном значении напряжения формируется дуговой разряд в новом полупериоде.

Характер изменения электрических параметров межэлектродного промежутка от момента перехода тока через нуль до момента зажигания, их величина и воспроизводимость в каждом последующем полупериоде определяют стабильность горения дуги в целом.

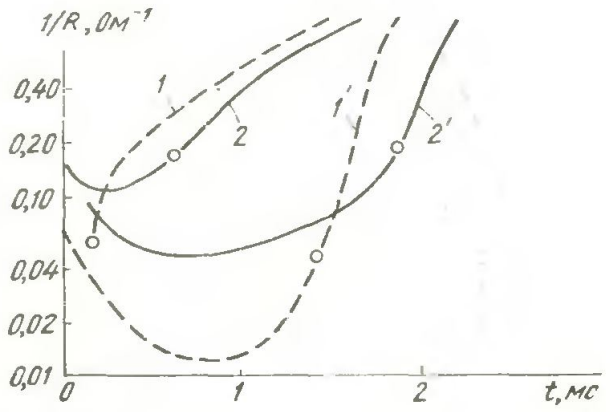


Рис. 51. Изменение проводимости разрядного промежутка во времени:

1 и *2* — электроды меловые и ОММ-5, в цепи дроссель; *1'* и *2'* — то же, в цепи балластное сопротивление; значками обозначены моменты зажигания дуги [73].

Стабильный процесс сварки на переменном токе характеризуется небольшими пиками напряжения зажигания в начале каждого полупериода или даже их полным отсутствием [128, 129], относительно большим преддуговым током и скоростью его нарастания [97], более высокой проводимостью и длительностью существования остаточной плазмы [73, 97].

Признаками нестабильного процесса являются высокое значение напряжения зажигания, величина которого может достигать напряжения холостого хода источника питания (крайний случай, дуга не возникает), небольшой преддуговой ток и малая скорость его нарастания, низкая проводимость остаточной плазмы.

На протяжении многих лет исследователи пользовались полуколичественными оценками стабильности процесса в непосредственной связи с исследуемыми сварочными материалами или источниками питания. Е. М. Кузьмак предложил характеризовать стабилизирующие свойства электродов коэффициентом стабильности, учитывающим частоту естественных обрывов дуги при сварке на переменном токе [80]. Благодаря простоте подобная методика используется иногда и другими исследователями [314]. В. П. Лугин усовершенствовал эту методику, применив специальное устройство для автоматического поджигания дуги после ее обрыва [100].

Наибольшее распространение получила методика К. К. Хренова [209], основанная на определении среднего значения длины дуги в момент обрыва при многократном повторении одного и того же эксперимента. Ее использование позволило определить влияние большого количества различных химических соединений на разрывную длину дуги. Как показано ниже, при удлинении дуги неизбежно изменяются все тепловые и электрические характеристики, в связи с чем при использовании этого метода в процесс горения дуги вносится ряд дополнительных возмущений.

Г. Н. Тиходеев [198] предложил измерять напряжение дуги раздельно в полупериоды прямой и обратной полярностей. При этом напряжение зажигания суммируется с напряжением на дуге. Этот метод позволяет в какой-то мере получить оценку стабильности дуги и не требует применения сложной аппаратуры.

После погасания дуги при очередном переходе тока через нуль остаточная плазма быстро остывает и ее проводимость резко падает. Длительность существования остаточной плазмы и величина ее проводимости в значительной мере определяют характер и параметры повторного зажигания дуги и, по нашему мнению, могут служить достаточно объективным критерием оценки ее стабильности.

И. В. Кирдо [73] измерял проводимость остаточной плазмы в зависимости от условий сварки и состава электродного покрытия методом зондирования межэлектродного промежутка. При исследовании процесса сварки толстопокрытыми электродами возникают серьезные методические трудности при использовании этого метода из-за малой длины дуги и наличия глубокой втулки из покрытия.

По данным Л. Г. Шафранского и А. В. Абрашина [215], более удобно зондировать межэлектродный промежуток напряжением холостого хода источника питания. Однако высокое напряжение может способствовать разогреву остаточной плазмы и тем самым искажать результаты экспериментов.

Г. И. Лесковым [97] предложено оцени-

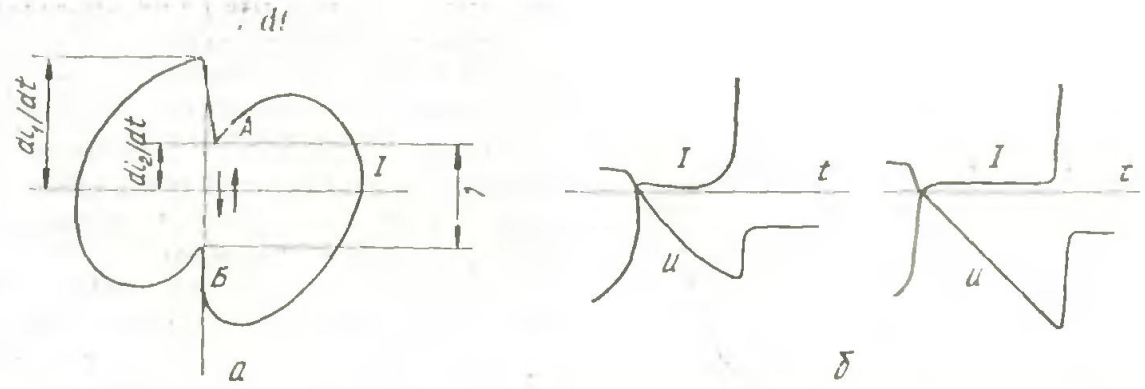


Рис. 52. К описанию методики оценки стабильности горения дуги Г. И. Лескова [97]:
а — фазовые траектории $dI/dt = f(I)$; *б* — изменение тока и напряжение в преддуговой период.

вать стабильность дуги по скорости нарастания тока при повторном ее зажигании в каждом полупериоде. Скорость нарастания тока регистрируется на экране осциллографа в виде фазовых траекторий. В соответствии с данными [97] производная dI/dt не меняет знак, но в момент перехода через нуль ее значение существенно уменьшается. Расстояние l (рис. 52, *а*) характеризует значение производной и может служить объективным критерием оценки стабилизирующих свойств покрытия. Использование нелинейных шунтов позволяет значительно увеличить точность измерения тока в области малых значений. Однако В. Ю. Арлауслас и И. Р. Нарушкявичюс [6] показали, что этим методом невозможно сравнить стабильность дуги при сварке на различных сварочных токах, так как скорость изменения тока (dI/dt) при переходе его через нуль определяется его амплитудным значением (при постоянной частоте), т. е. чем меньше ток, тем ниже значение dI/dt. Это значит, что при малых токах горение дуги невозможно, что не подтверждается экспериментами. В связи с этим авторы предложили оценивать стабильность повторного зажигания (по фазовым траекториям) по отношению

$$K_з = \frac{di_2/dt}{di_1/dt} \cdot 100\ \%, \qquad (2.1)$$

где $K_з$ — показатель стабильности повторного зажигания дуги переменного тока; di_1/dt — максимальная скорость изменения тока перед погасанием дуги (см. рис. 52, *а*); di_2/dt — минимальная скорость изменения сварочного тока в процессе повторного зажигания дуги (см. рис. 52, *а*).

Авторы работы [6] считают, что использование коэффициентов $K_з$ удобно, так как отпадает необходимость в градуировке приборов и измерении абсолютных величин производных, но для достоверного определения величины $K_з$ требуется длительное наблюдение за фазовыми траекториями (сварка тремя — пятью электродами). К сожалению, в указанной работе отсутствуют конкретные примеры использования данной методики, в связи с чем трудно оценить ее достоверность и удобство. Для реализации этой методики необходимо устройство синхронизации с аппаратурой для киносъемки с экрана осциллографа, а также система запуска лучей.

По мнению В. А. Троицкого [200], скорость перехода тока через нуль определяется только характеристикой источника питания и, следовательно, влияние свойств сварочных материалов на dI/dt должно быть выражено незначительно.

И. И. Заруба и В. В. Дыменко [57] попытались объединить в одном показателе параметры переноса металла, повторного зажигания дуги, свойств плазмообразующего газа и сварочных трансформаторов [57]:

$$K = \frac{I_{кр}}{\tau} = \frac{\omega}{2 \arcsin \dfrac{U_з}{U_m}} \left(I_m \sin \varphi - 2en_{0e}r_к^2 \sqrt{\frac{8\pi KT}{m_i}}\right), \qquad (2.2)$$

где $I_{кр}$ — ток дуги, ниже которого дуга может погаснуть при прохождении через

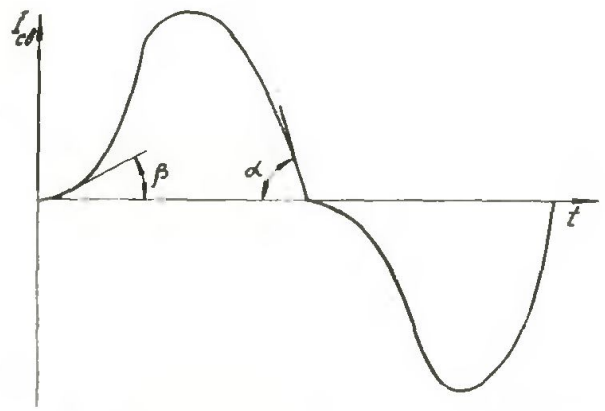


Рис. 53. К определению критерия А. Бессона [303].

нее капли электродного металла; τ — время, в течение которого напряжение на дуговом промежутке меньше напряжения зажигания; $r_к$ — радиус капель электродного металла; n_{0e} — концентрация электронов в столбе дуги; m_i — масса атома плазмообразующего газа; T — температура плазмы в столбе дуги; U_m, I_m — амплитудные значения напряжения холостого хода трансформатора и тока сварки.

Авторы работы [57] указывают, что использовать этот показатель можно тогда, когда перенос металла осуществляется без коротких замыканий (КЗ).

Для определения показателя K необходимо: провести скоростную киносъемку дуги и синхронное шлейфовое осциллографирование напряжения и тока дуги; измерить $U_з$; определить τ; определить гранулометрический состав капель электродного металла; измерить размеры капель $r_к$, перелетающих дуговой промежуток в конце полупериода, т. е. в интервал времени от τ/2 до конца полупериода; учесть величину m_i; измерить концентрацию n_{0e}; определить значения U_m и I_m.

Большая трудоемкость метода, по нашему мнению, будет препятствовать его широкому применению.

Учитывая, что показатель K разработан для сварки без КЗ, следует отметить, что для ручной дуговой сварки покрытыми электродами он неприемлем, так как в этом случае перенос металла осуществляется преимущественно с КЗ [97, 148]. Кроме того, наличие козырька из покрытия на торце электрода не позволяет использовать киносъемку для определения $r_к$ и момента отрыва капель от электрода. Поэтому этот показатель нельзя применять даже в том случае, когда при сварке покрытыми электродами перенос металла осуществляется без КЗ (сварка электродами с рутиловым видом покрытия на форсированных режимах).

В методике А. Бессона [303] стабилизирующие свойства сварочных электродов оцениваются по степени искажения кривой сварочного тока (рис. 53), определяемой как отношение тангенсов углов β и α:

$$A = \operatorname{tg}\beta / \operatorname{tg}\alpha. \qquad (2.3)$$

Чем ближе указанное отношение к единице, тем выше стабильность дуги. Степень искажения кривой тока зависит как от электрических свойств дуги, так и от конструктивных особенностей трансформатора, и критерий А. Бессона учитывает это. Действительно, согласно анализу, выполненному Т. С. Саладженом и С. Боарна [303], этот критерий может быть представлен в виде

$$A = \frac{\sqrt{2}U_{х\,х}\sin\varphi - U_д}{\sqrt{2}U_{х.х}\sin\varphi + U_д}. \qquad (2.4)$$

Видно, что критерий A включает в себя характеристики конструкции трансформатора $U_{х.х}$, φ и дуги $U_д$. Исследования по определению A, проведенные в этой работе, показали, что критерий достаточно верно отражает влияние характеристик сварочных материалов и трансформатора. Однако точное определение положения касательных по осциллограммам тока затруднено. Связанная с этим большая погрешность вычисления значений A является серьезным недостатком методики А. Бессона. Пути уточнения положения касательных, предложенные в работе [303], повышают точность оценки, но одновременно усложняют ее, так как требуют определения параметров трансформатора в режиме холостого хода.

Л. Дорн и П. Риппл [239] предлагают оценивать стабильность дуги постоянного и переменного тока по площади «рабочего поля» характеристики $U_д = f(I_{св})$, получаемом на катодном осциллографе (дисплее, графопостроителе) путем наложения множества кривых $U_д = f(I_{св})$

одна на другую за определенное время сварки, в результате чего образуется засвеченное «рабочее поле». Чем меньше площадь этого поля, тем стабильнее дуга. Однако при очевидности этого утверждения в реальных результатах наблюдается противоречие. Так, рабочее поле по напряжению дуги у электродов основного типа меньше, чем у рутилового, несмотря на худшие стабилизирующие свойства первых.

Приближенным к требованиям практики является метод, основанный на определении минимального напряжения холостого хода сварочного трансформатора $U_{х.х}^{мин}$, при котором дуга горит еще без обрывов [133, 51]. При этом предполагается использование трансформатора с регулируемым напряжением $U_{х.х}$. Заранее находя значение $U_{х.х}^{мин}$ для конкретного электрода и зная напряжение холостого хода используемого трансформатора, можно оценивать «резерв» напряжения холостого хода $\Delta U_{х.х}$, который будет определять надежность повторного зажигания, учитывая и свойства электродного покрытия (через значение $U_{х.х}^{мин}$), и свойства трансформатора (через значение $U_{х.х}$):

$$\Delta U_{х.х} = U_{х.х} - U_{х.х}^{мин}. \qquad (2.5)$$

Одним из недостатков метода является необходимость регистрации обрыва дуги, который заметен, когда дуга либо погасла окончательно, либо погасла и вновь самостоятельно возбудилась через промежуток времени, превышающий 0,2—0,5 с. В связи со спецификой органов зрения, погасание дуги на время, равное одному или нескольким полупериодам, визуально зарегистрировать невозможно. Число таких полупериодов, когда дуга не зажигается, но окончательного обрыва дуги не происходит, может достигать, по нашим данным, до 20 % от общего числа полупериодов. Такой процесс горения дуги стабильным назвать нельзя. В связи с этим необходимо определять напряжение $U_{х.х}^{мин}$ по принципу отсутствия как окончательного обрыва дуги, так и полупериодов ее негорения. Для решения этой задачи необходимо применять методы количествен-

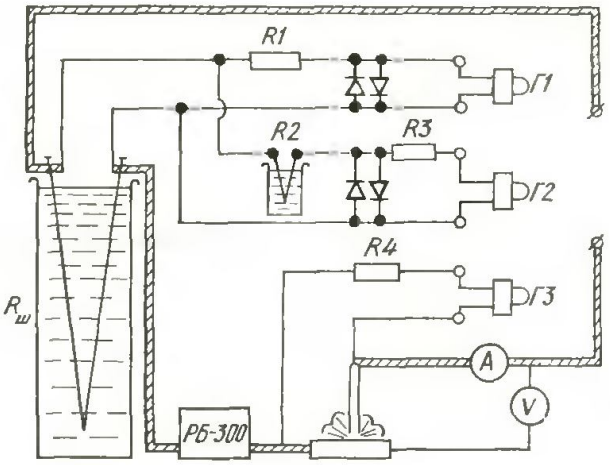


Рис. 54. Схема измерения параметров зажигания дуги, $R_ш = 0{,}078$ Ом.

ной оценки электрических и временных параметров повторного зажигания дуги.

Б. Е. Патон [128] предложил метод определения напряжения $U_{х.х}^{мин}$, используя среднее значение напряжения повторного зажигания дуги в полупериоды обратной полярности $+U_з^{ср}$ и кривые, связывающие параметры $U_{х.х}^{мин}$ и $U_з^{ср}$ в зависимости от свойств сварочной цепи (по осциллограммам напряжения дуги). Этот подход хорошо обоснован и, на наш взгляд, отражает состояние межэлектродного промежутка в наиболее важный преддуговой период.

Большой интерес представляет также методика Г. И. Лескова [97], основанная на использовании нелинейного шунта для измерений величины преддугового тока, который характеризует остаточную проводимость плазмы, а следовательно, и процессы повторного зажигания.

Таким образом, стабильность горения дуги переменного тока определяют процессы, протекающие в переходный период. Дуга устойчива, если потери тепла в окружающее пространство компенсируются подводимой электрической мощностью.

Условие динамической устойчивости дугового промежутка в области нулевых значений тока описывается неравенством [97]

$$1/CR_0 > 1/\theta, \qquad (2.6)$$

где R_0 — сопротивление межэлектродного промежутка; θ — постоянная времени дуги ($\theta = \theta_0/P_0$), т. е. время, в течение которого энергия тел Q_0, входящих в

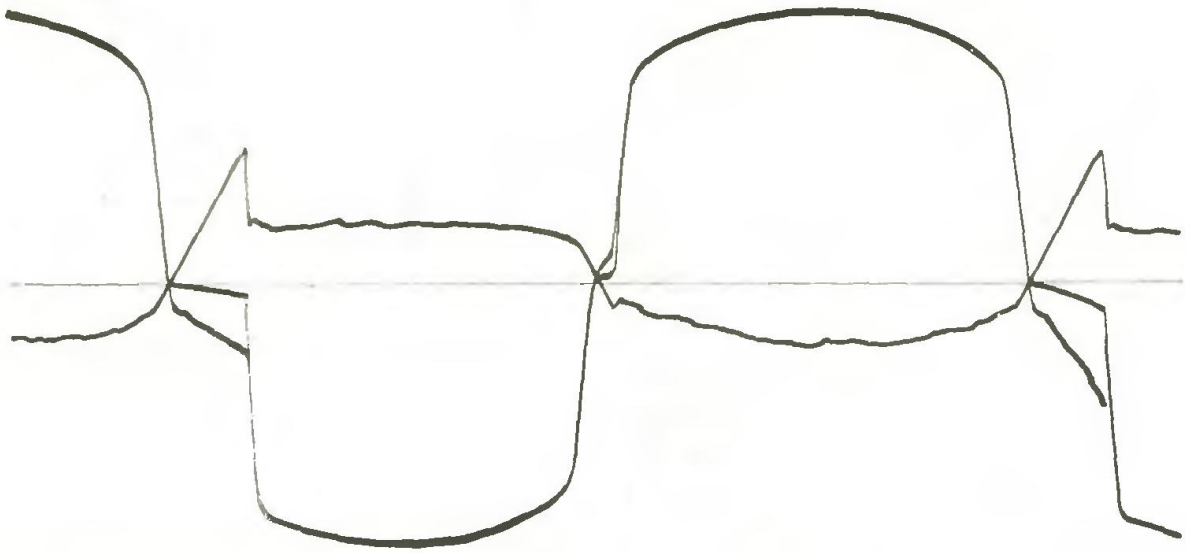


Рис. 55. Типичная осциллограмма процесса сварки переменным током, полученная с применением нелинейных шунтов.

дуговой промежуток, полностью рассеивается при средней мощности потерь, равной P_0.

Из неравенства (2.6) следует, что стабильность дуги лучше всего характеризовать показателями, отражающими сопротивление (или проводимость) межэлектродного промежутка.

Рассмотрим момент повторного зажигания дуги. В каждом новом полупериоде проходит определенное время $t_з$, прежде чем подводимая к электродам мощность достигнет уровня, необходимого для восстановления дугового разряда (см. рис. 50). Если $U_з$ и $I_з$ — напряжение на электродах и ток в межэлектродном промежутке в момент восстановления разряда, то показатель стабильности горения дуги ($Ом^{-1} \cdot с^{-1}$) можно записать в виде

$$B_з = I_з / U_з t_з. \qquad (2.7)$$

Выразим напряжение зажигания как

$$U_з = U_{х.х} \sqrt{2} \sin(\omega t_з + \varphi), \qquad (2.8)$$

где φ — угол сдвига по фазе между током и напряжением холостого хода. Из этого уравнения следует

$$t_з = \frac{\arcsin \dfrac{U_з}{U_{х.х}\sqrt{2}} - \varphi}{\omega}. \qquad (2.9)$$

Заменив ω на $2\pi f$ и подставив уравнение (2.9) в (2.7), получим

$$B_з = \frac{2\pi f I_з}{U_з \left(\arcsin \dfrac{U_з}{U_{х.х}\sqrt{2}} - \varphi \right)}. \qquad (2.10)$$

Показатель $B_з$ включает в себя основные параметры электрической цепи и отражает их влияние на стабильность дуги. Он увеличивается с возрастанием тока $I_з$, частоты, напряжения $U_{х.х}$, угла φ и с уменьшением напряжения $U_з$.

На начальном этапе исследований авторами настоящей работы отрабатывалась методика оценки стабильности дуги переменного тока с применением шлейфового осциллографа 8SO-4 (ГДР) и нелинейного шунта, предложенного Г. И. Лесковым [97]. Применялись высокочастотные гальванометры (частота собственных колебаний $0{,}5 \cdot 10^4$ и $1 \cdot 10^4$ Гц). Использовалась аэрофотопленка чувствительностью 1200 ед. по ГОСТ 10691—63, шириной 120 мм. Скорость записи составляла 9 м/с.

Схема измерений представлена на рис. 54. Напряжение дуги через магазин сопротивлений *R4* подавалось на гальванометр *Г3*. С безындукционного водоохлаждаемого шунта $R_ш$ снималось напряжение, пропорциональное сварочному току. Сварка осуществлялась от трансформатора ТСД-500 ($U_{х.х} = 80$ В) с отключенным дросселем и включенным последовательно балластным реостатом РБ-300. Поскольку значения тока зажигания $I_з$ для разных электродов могут отличаться более чем на порядок, для его

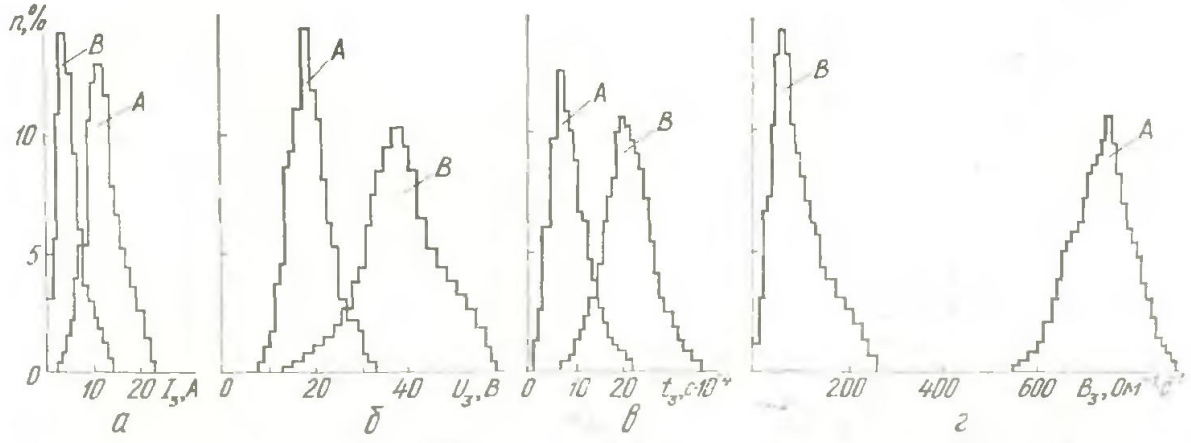


Рис. 56. Распределение плотности вероятностей тока (*а*) и напряжения (*б*) в момент зажигания дуги, длительности преддугового периода (*в*) и показателя стабильности $B_з$ (*г*):
А — электроды рутилового типа (АНО-4); *В* — электроды основного типа (АНО-11).

регистрации использовали два параллельно подключенных нелинейных шунта разной чувствительности. Сигналы от шунтов поступали на два гальванометра одной группы (*Г1* и *Г2*). Типичная осциллограмма показана на рис. 55.

На базе этой методики совместно с Институтом ядерных исследований (ИЯИ) АН УССР созданы специализированные информационно-измерительные системы АНП-1 и АНП-2 (см. параграф 2 настоящей главы), позволившие намного сократить затраты времени на обработку осциллограмм, увеличить точность и достоверность получаемой информации.

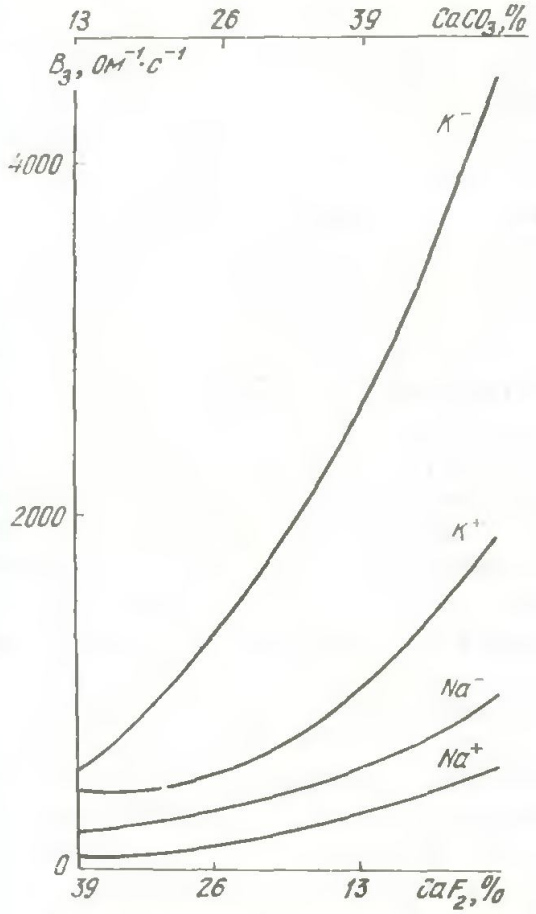


Рис. 57. Зависимость показателя стабильности $B_з$ от состава покрытия и связующего (К — калиевое, Na — натриевое жидкое стекло, плюс — положительный полупериод, минус — отрицательный).

Типичная гистограмма распределения напряжений в момент зажигания дуги для электродов с рутиловым и фтористокалиевым покрытиями (рис. 56, *б*) указывает на существенное отличие их стабилизирующих свойств. При сварке электродами с рутиловым покрытием, обеспечивающими стабильное горение дуги, наблюдаются низкие значения $U_з$ с небольшим отклонением от статистически наиболее вероятных величин. При сварке электродами с фтористокальциевым покрытием значения $U_з$ велики. Одновременно увеличивается и диапазон их колебаний. Подобный вид имеют распределения для тока (рис. 56, *а*) и времени зажигания дуги (рис. 56, *в*).

Развивая методы, предложенные в работах [97, 129], можно пользоваться в качестве показателя стабильности полученными значениями распределений для $U_з$, $I_з$ или $t_з$ в отдельности. Однако в ряде случаев более удобен показатель $B_з$, обобщающий эти параметры и характеризующий проводимость межэлектродного промежутка. Так, для взятых нами двух типов электродов с рутиловым и фтористокальциевым покрытиями $B_з$ составляет

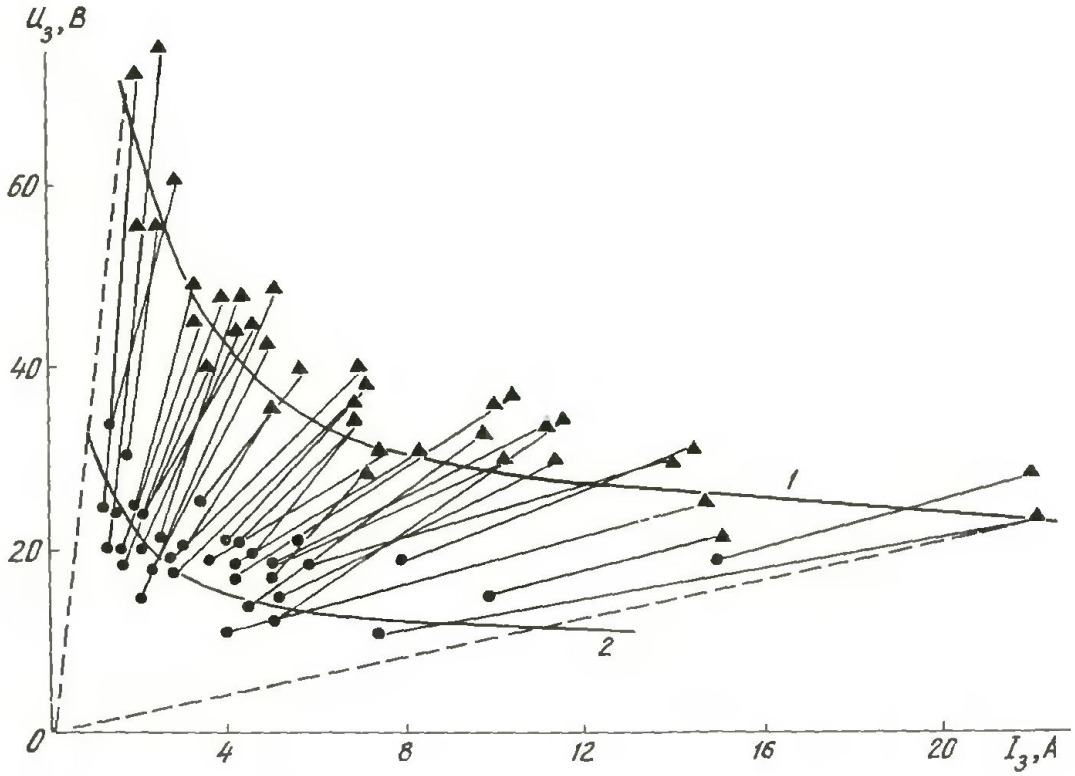


Рис. 58. Связь между напряжением $U_з$ и током $I_з$ зажигания дуги при сварке опытными и промышленными электродами с рутиловым и фтористокальциевым покрытиями (источники питания — трансформаторы с $U_{х.х}$ 80 и 135 В без дросселей:

1 — положительный полупериод; *2* — отрицательный

соответственно 710 и 43 $Ом^{-1} \cdot с^{-1}$ (рис. 56, *в*).

На первом этапе отработки методики объектом исследования были электроды с различным соотношением мрамора и плавикового шпата в покрытии. Суммарное их содержание сохранялось постоянным (52 %). Остальная часть покрытия приходилась на рутил, ферромарганец, ферросилиций и железный порошок, соотношение между которыми не изменяли. Часть электродов изготавливались на натриевом жидком стекле, часть — на калиевом (рис. 57). Диаметр электродов 4 мм, толщина покрытия на сторону 1,1 мм. Источник питания — последовательно соединенные трансформаторы ТСД-500 и СТЭ с суммарным $U_{х.х}$ = = 135 В. Для более четкого выявления переходных процессов дроссели трансформаторов отключались, а сварочный ток регулировался балластными реостатами.

Как видно из рис. 57, с уменьшением содержания CaF_2 в покрытии показатель стабильности дуги возрастает. Особенно резкое увеличение $B_з$ наблюдается у электродов серии К, содержащих в покрытии соединения калия.

При одном и том же составе покрытия показатель $B_з$ меньше в том полупериоде тока, в котором катод формируется на ванне. Чем хуже стабилизирующие свойства покрытия, тем больше эта разница. Данный вывод подтвердился при испытании электродов многих опытных и промышленных марок с рутиловым и фтористокальциевым покрытиями (рис. 58). Полученную взаимосвязь тока и напряжения для любого полупериода одной полярности тока можно выразить уравнением $P = U_з I_з \approx \text{const}$, и это подтверждает предположение о постоянной мощности повторного зажигания дуги [97]. Если же сравнивать разные полупериоды тока, то постоянство этой мощности не наблюдается. Для положительного полупериода тока (плюс на электроде) взаимосвязь $U_з$ и $I_з$ хорошо описывается эмпирическим выражением

$$+U_з = \frac{100}{+I_з} + 20, \qquad (2.11)$$

а для отрицательного она имеет вид

$$-U_з = \frac{25}{-I_з} + 10. \qquad (2.12)$$

Следовательно, в полупериод тока, когда катод формируется на ванне, подводимая мощность, необходимая для восстановления дугового разряда, существенно больше благодаря одновременному увеличению $U_з$ и $I_з$. В то же время точки, определяющие значения $U_з$ и $I_з$ для разных полупериодов тока (в одном и том же эксперименте), как правило, размещаются на прямой, стремящейся к началу координат (на рис. 58 такие прямые показаны прямыми линиями). Котангенс угла наклона этих прямых представляет собой проводимость межэлектродного промежутка в момент повторного зажигания дуги, для прямого и обратного полупериодов тока он одинаков. Величина $B_з$ для разных полупериодов различна, поскольку одна и та же проводимость достигается быстрее в том случае, когда катодом служит электрод, а не ванна.

Асимметрия показателя $B_з$ в полупериоды разной полярности подтверждает, что формирование катода на ванне энергетически более затруднено, чем на электроде. Это, видимо, связано с меньшей средней температурой металла сварочной ванны и большей скоростью охлаждения активных пятен в результате теплоотвода в изделие [148].

Влияние сварочного тока на показатель $B_з$ показано на рис. 59. Сварка выполнялась электродами диаметром 4 мм с основным покрытием, питание от трансформатора СТШ-500-80 ($U_{(х.х)} = 80$ В). Значение $B_з$ возрастает пропорционально сварочному току на обеих полярностях, но и в этом случае оно меньше при формировании катода на ванне.

С увеличением сварочного тока возрастают температура и масса расплавленного металла, что повышает тепловую инерционность электродов и энергию тел, входящих в межэлектродный промежуток. Повышающаяся в связи с этим постоянная времени дуги способствует снижению сопротивления межэлектродного промежутка и облегчает повторное зажигание дуги [218].

Экспериментально установлено, что

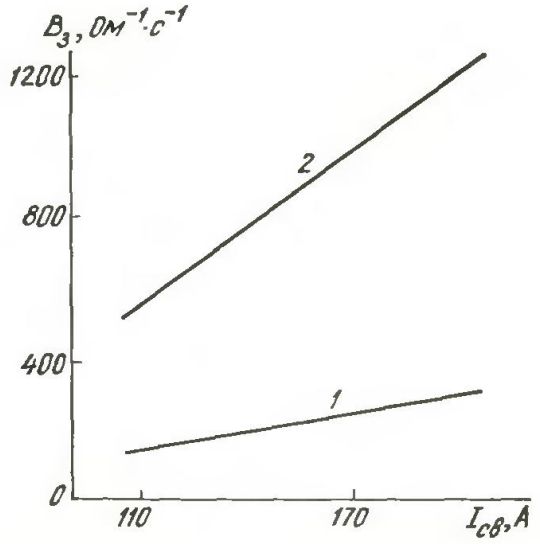


Рис. 59. Зависимость показателя стабильности горения дуги от сварочного тока:
1 — положительный полупериод; *2* — отрицательный.

для источников питания без дросселя пороговое значение показателя стабильности в положительном полупериоде, когда начинают появляться обрывы дуги, составляет около 150 ± 20 Ом$^{-1}$ · с$^{-1}$.

В работах [97, 129] отмечается, что для надежного повторного зажигания дуги необходимо, чтобы напряжение, прикладываемое к дуговому промежутку, было больше максимального напряжения зажигания $U_з^{макс}$, причем Б. Е. Патон [129] рекомендует учитывать напряжение $+ U_з^{макс}$, а Г. И. Лесков считает, что дуга не возбуждается лишь в те полупериоды, когда катодом является плавящийся электрод [97]. Для проверки этого тезиса нами проведены эксперименты, которые заключались в следующем. Параметры $U_д$ и $U_{х.х}$ регистрировались шлейфовым осциллографом при многократном удлинении дуги до обрыва. По осциллограммам определялось значение $U_з$ в последнем до обрыва дуги полупериоде, которое сопоставлялось с амплитудным значением холостого хода $U_{х.х}^{а}$. Как показали опыты, дуга чаще всего повторно не зажигается в полупериоды обратной полярности.

Таким образом, условие надежного повторного зажигания дуги переменного тока может выглядеть так:

$$U_{х.х}^{а} \geqslant + U_з^{макс}. \qquad (2.13)$$

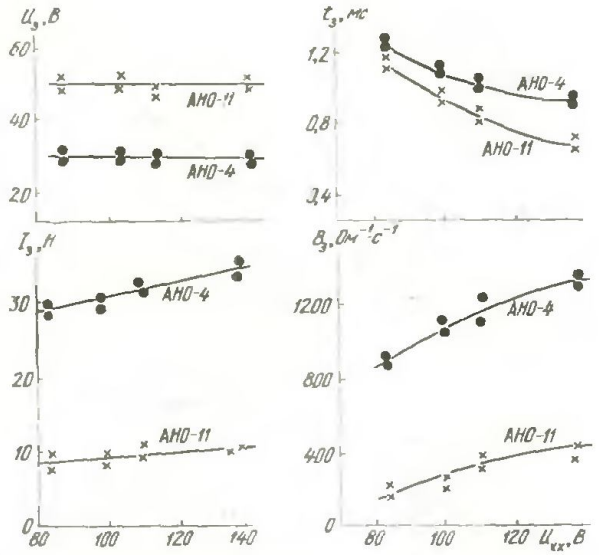


Рис. 60. Зависимость параметров дуги переменного тока от $U_{х.х}$ трансформатора в момент повторного зажигания. Электроды основного (АНО-11) и рутилового (АНО-4) типов ($I_{св}$ = 180 А).

Следовательно, для оценки надежности повторного зажигания необходимо определить напряжение $+U_з^{макс}$. Это можно сделать путем выбора наибольшего из всех значений $+U_з$, полученных за время эксперимента. Однако значения $+U_з^{макс}$, полученные таким путем, существенно изменяются от опыта к опыту (на 10—15 В). Исследования показали, что распределение напряжения $+U_з$ при сварке электродами, как правило, подчиняется нормальному закону. В соответствии с этим, по правилу «трех сигм» значение $+U^{макс}$ с достоверностью 99,7 % определяется как [111]

$$+U_з^{макс} = +U_з^{ср} + 3\sigma, \qquad (2.14)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение распределения плотностей вероятностей параметра $+U_з$.

Зная значение $+U_з^{макс}$ и учитывая условие (2.13), можно вычислить минимальное напряжение холостого хода сварочного трансформатора, на котором дуга должна гореть без обрывов:

$$U_{х.х}^{мин} = \frac{+U_з^{макс}}{\sqrt{2}} = \frac{+U_з^{ср} + 3\sigma}{\sqrt{2}}. \qquad (2.15)$$

В процессе отработки методики нами установлено [294], что напряжение $U_з$ почти не зависит от условий проведения эксперимента: режима сварки, напряжения холостого хода, индуктивности трансформатора. Эти данные (рис. 60 и 61) свидетельствуют о том, что значения $+U_з$ можно использовать как простую и удобную характеристику стабилизирующих свойств сварочного материала (электрода).

Предложенные показатели $B_з$, $U_з$ и $U_{х.х}^{мин}$ обладают определенными достоинствами и недостатками. Показатель стабильности $B_з$ позволяет количественно оценивать влияние на стабильность дуги состава покрытия электродов, режима сварки, характеристик источников питания (см. рис. 60), но при этом требуется стандартизация условий эксперимента, например один и тот же источник питания при исследовании электродов и режима сварки или, наоборот, одна марка электродов и режим сварки при испытаниях трансформаторов.

Использовать в качестве показателя стабильности напряжение зажигания (или производное от него напряжение $U_{х.х}^{мин}$) зачастую удобнее, так как $U_з$ практически не зависит от напряжения холостого хода трансформатора и мало зависит от величины индуктивности сварочной цепи и сварочного тока (см. пятую гл.).

При наличии шлейфовых осциллографов этими показателями можно пользоваться практически в любых лабораториях, следует лишь учитывать большую трудоемкость статистической обработки осциллограмм.

Стабильность дуги постоянного тока. При сварке покрытыми электродами на постоянном токе нарушения процесса горения дуги связаны чаще всего с перено-

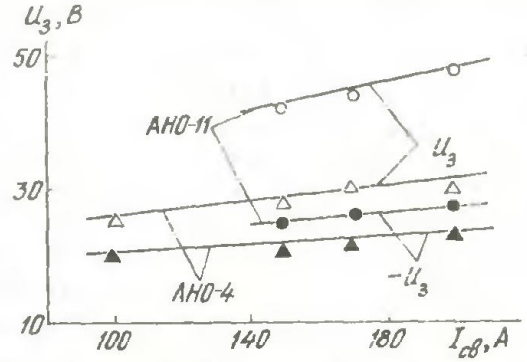


Рис. 61. Зависимость напряжения зажигания от тока сварки ($U_{хх}$ = 135 В, $d_э$ = 4 мм).

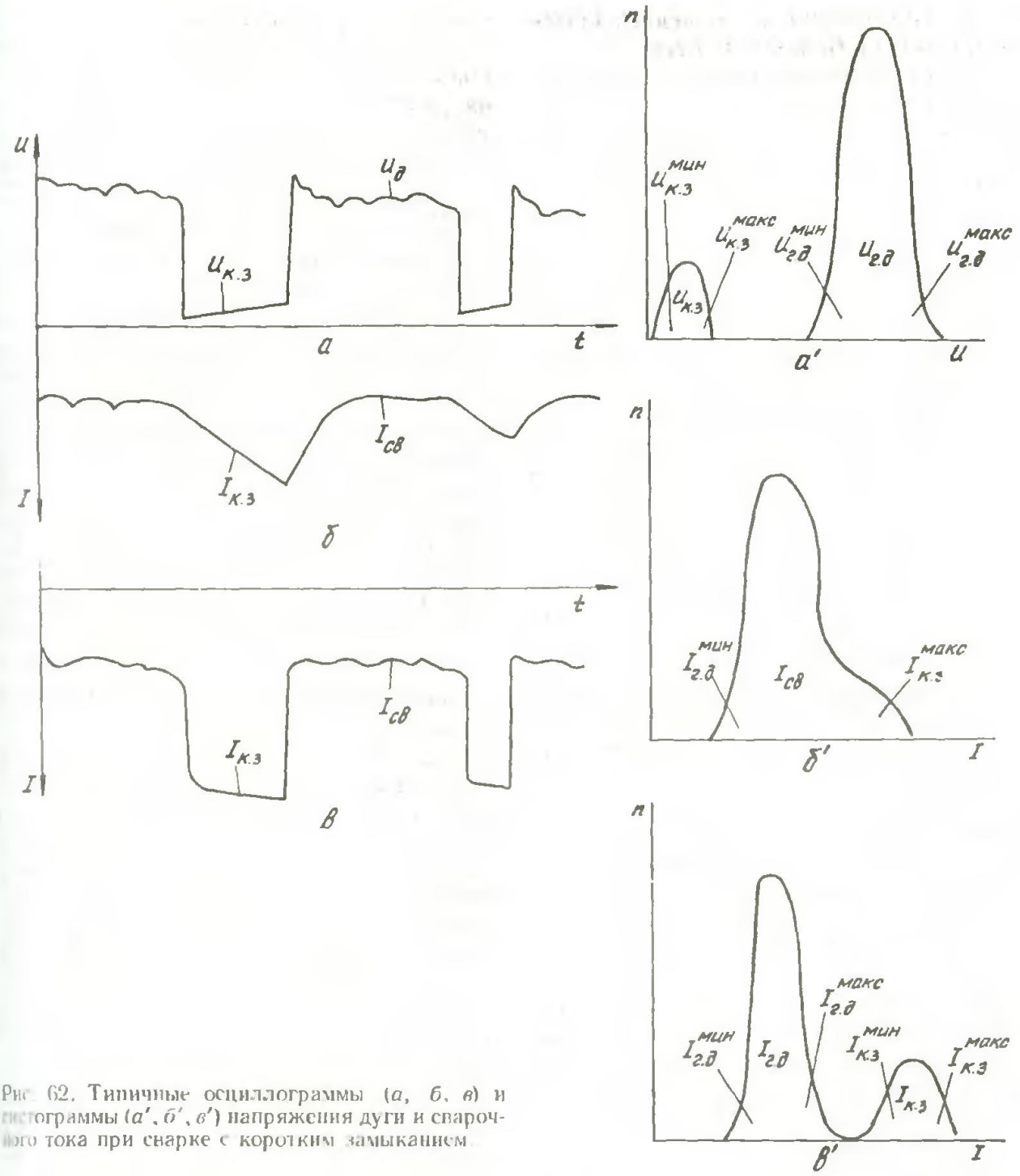


Рис. 62. Типичные осциллограммы (*а*, *б*, *в*) и гистограммы (*а′*, *б′*, *в′*) напряжения дуги и сварочного тока при сварке с коротким замыканием

сом капель электродного металла, особенно если процесс сопровождается короткими замыканиями дугового промежутка. Шунтирование дуги каплей приводит к ее погасанию, однако полной деионизации межэлектродного промежутка не происходит. В конце короткого замыкания образуется тонкая перемычка сильно перегретого металла с частичным его испарением. В такой парогазовой фазе дуга легко возобновляется вновь.

Перенос электродного металла можно оценивать по длительности коротких замыканий $\tau_{к.з}$. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют об информативности этого показателя.

При отсутствии коротких замыканий флуктуации напряжения и сварочного тока происходят в меньшей степени, однако они также имеют место и могут оказывать существенное влияние на процесс сварки. Такой режим более характерен для некоторых видов сварки, например, порошковыми проволоками, под флюсом

и т. п. Применение в последнее время для оценки стабильности дуги постоянного тока информационно-измерительных систем, включающих в себя ЭВМ, позволило использовать для этого методы математической статистики и выделить несколько критериев [85, 298, 239]. Так, авторы работ [298, 271, 304, 305, 309] предложили оценивать стабильность дуги постоянного тока по дисперсии σ^2 мгновенных значений напряжения дуги $U_д$ при многократном его измерении. Чем меньше значение σ^2, тем стабильнее дуга.

Этот метод был нами проверен. Оказалось, что у электродов с рутиловым покрытием (с высокими стабилизирующими свойствами) значения σ^2 больше, чем у электродов с основным покрытием и с низкими стабилизирующими свойствами. По нашему мнению, это обусловлено различием в характере переноса металла. Чем меньше размер капель электродного металла, тем больше частота их переноса и тем чаще напряжение дуги отклоняется от среднего значения. При крупнокапельном переносе металла (характерном для электродов с основным видом покрытия) эти колебания напряжения дуги значительно реже и соответственно меньше значение σ^2. Этот факт отмечен также в работе [239]. Таким образом, наличие обратно пропорциональной связи между стабильностью дуги и значением σ^2 подтверждается не всегда.

Длительный поиск оптимального алгоритма обработки электрических сигналов показал, что наиболее полно информация о процессе может быть представлена в виде гистограмм текущих значений напряжений дуги и сварочного тока (универсальный режим). Такие распределения, как правило, многомодальны, что свидетельствует о наличии коротких замыканий, обрывов, шунтирования дуги и пр.

В качестве примера рассмотрим процесс сварки с короткими замыканиями (рис. 62). Резкие понижения напряжения дуги от значений, соответствующих периоду ее горения, до значений, соответствующих моменту короткого замыкания (рис. 62, *а*) приводят к получению двухмодальных распределений параметра $U_д$ (рис. 62, *а'*). Левая часть гистограммы $U_д$ соответствует напряжению в момент короткого замыкания $U_{к.з}$, правая — напряжению дуги $U_{г.д}$. В каждом из этих распределений можно найти минимальные и максимальные значения указанных параметров $U_{к.з}^{мин}$, $U_{к.з}^{макс}$, $U_{г.д}^{мин}$, $U_{г.д}^{макс}$, а также их средние значения $U_{к.з}^{ср}$, $U_{г.д}^{ср}$, используя метод поэтапной обработки гистограмм.

Скорость изменения тока сварки при КЗ зависит в основном от индуктивности сварочного контура. При большой индуктивности ток в момент короткого замыкания $I_{к.з}$ возрастает медленно и также медленно уменьшается по окончании КЗ (рис. 62, *б*). При этом, если КЗ кратковременны, то ток $I_{к.з}$ может не достигать максимально возможных значений. Характерная для этого случая гистограмма тока $I_{св}$ показана на рис. 62, *б'*. Обрабатывая ее, можно получить минимальное значение тока горения дуги $I_{г.д}^{мин}$, максимальное значение тока КЗ $I_{к.з}^{макс}$ и среднее значение тока сварки $I_{св}^{ср}$.

При незначительной индуктивности сварочного контура ток в начальный момент КЗ возрастает резко и даже при кратковременных КЗ может достигать максимально возможных значений (рис. 62, *в*). После окончания КЗ, уменьшение тока носит такой же характер. Такие изменения тока сварки приводят к получению двухмодального распределения плотности вероятностей параметра $I_{св}$ (рис. 62, *в*). Левое распределение соответствует режиму горения дуги, правое — КЗ. В этом случае при анализе гистограмм параметра $I_{св}$ имеется возможность определить минимальное, максимальное и среднее значения тока горения дуги, а также минимальное, максимальное и среднее значения тока КЗ. При обработке гистограмм параметров $U_д$ и $I_{св}$ с помощью ЭВМ необходимо определять не только средние значения $U_{к.з}$, $U_{г.д}$, $U_д$, $I_{к.з}$, $I_{г.д}$ и $I_{св}$, но и их характеристики рассеяния.

Преимущества этой методики наиболее полно могут использоваться для оценки стабильности дуги при механизированной сварке. В этом случае, как правило, используются источники питания с жест-

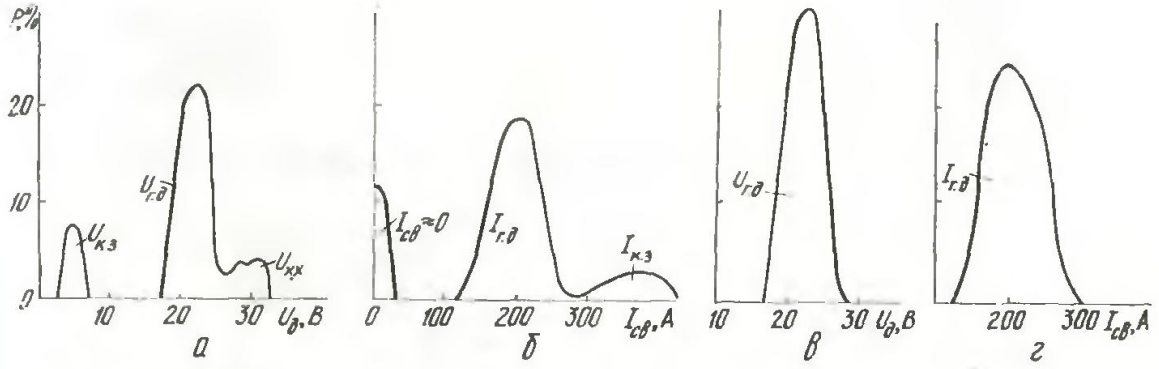


Рис. 63. Гистограммы параметров $U_д$ и $I_{св}$ при автоматической сварке порошка всей проволокой со стабилизирующими добавками (*а*, *б*) и без них (*в*, *г*):
а — $K_v = 15$ %; *б* — 31 %; *в* — 6 %; *г* — 9 % ($d_э = 2$ мм, $U_д = 24$ В, $I_{св} = 200$ А).

кой внешней характеристикой, в результате чего напряжение холостого хода и напряжение дуги являются сопоставимыми величинами. Это приводит к тому, что при нестабильном горении дуги напряжение $U_д$ может достигнуть значения $U_{х.х}$ и дуга либо кратковременно оборвется (рис. 63), либо погаснет окончательно. Для этих условий характерна трехмодальная форма гистограмм напряжения дуги и тока сварки (рис. 63, *а*), анализ которых дает возможность количественно оценить стабильность дуги. Для этого необходимо определить отношение площадей участков гистограммы $U_д$ ($U_{к.з}$, $U_{г.д}$ и $U_{х.х}$) и гистограммы $I_{св}$ ($I_{г.д}$, $I_{к.з}$ и $I_{св} \approx 0$). С улучшением стабильности дуги площадь участков гистограмм, соответствующих параметрам $U_{к.з}$, $U_{х.х}$, $I_{к.з}$ и $I_{св} \approx 0$ уменьшается. С точки зрения стабильности дуги оптимальным является вариант, когда на гистограммах $U_д$ и $I_{св}$ полностью отсутствуют участки, соответствующие параметрам $U_{к.з}$, $U_{х.х}$, $I_{к.з}$ и $I_{св} \approx 0$ (рис. 63, *б*). Однако соблюдение этого условия не означает, что дальнейшая оценка стабильности дуги лишена смысла, т. е. достигнута наилучшая стабильность дуги. Дальнейшая оценка стабильности дуги в этом случае основывается на определении характеристик рассеяния параметров $U_д$ и $I_{св}$ (среднеквадратического отклонения σ, коэффициента вариации K_v и т. п.). С улучшением стабильности дуги значения σ и K_v уменьшаются.

Таким образом, для количественной оценки стабильности дуги постоянного тока можно использовать значения длительности коротких замыканий (при их наличии), напряжения горения дуги, тока сварки, тока короткого замыкания и другие с использованием анализа распределения $U_д$ и $I_{св}$ и методов поэтапной обработки гистограмм.

2. Аппаратура для измерений электрических и временных параметров

Методика оценки стабильности дуги переменного тока, отработанная с применением шлейфового осциллографа и нелинейных шунтов, усовершенствована путем широкого применения средств вычислительной техники для обработки электрических и временных параметров сварочной дуги. Основные преимущества методики — высокая точность измерений, отсутствие искажений данных об изучаемом процессе, присущее шлейфовым осциллографам, большая скорость обработки информации. Эти обстоятельства позволяют повысить достоверность получаемых данных увеличением объема первичной информации в 10^2—10^3 раз, а также сократить время на получение и обработку результатов как минимум в 10^4 раз.

В последнее десятилетие появилась целая серия различных анализаторов сварочных процессов, созданных на базе ЭВМ [194, 246, 287]. Анализаторы позволяют измерять и статистически обрабатывать значения $U_д$, $I_{св}$, $\tau_{к.з}$, интервалов между КЗ и т. п. По имеющимся данным

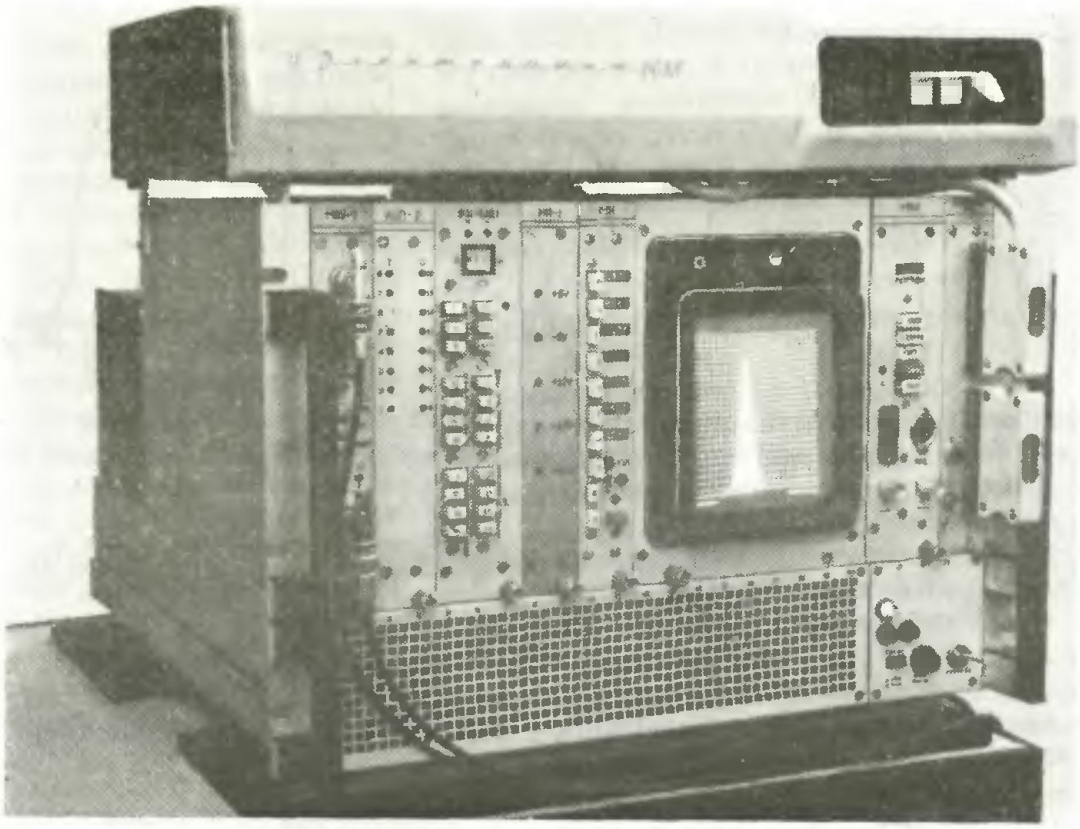


Рис. 64. Информационно-измерительная система АНП-2.

для анализа стабильности дуги переменного тока эти системы не предназначены.

На первом этапе исследования нами использовалась информационно-измерительная система анализатор нестационарных процессов АНП-1 и ЭВМ М-6000 [169, 154], разработанная ИЭС им. Е. О. Патона совместно и ИЯИ АН УССР. Анализатор АНП-1 с гибкой системой программирования позволил выбрать наиболее информативные показатели и алгоритмы обработки поступающей информации.

Эксперименты показали, что изменение измеряемых параметров во времени подчиняется в основном нормальному закону распределения, однако, как правило, во время сварки мы получаем информацию сразу о нескольких процессах, и поэтому получаемые распределения имеют вид двух, трех-, а иногда и четырехмодальных. Это означает, что обрабатывать информацию «вслепую» нельзя, требуется ее представление на экране графического дисплея для определения участка гистограммы, подлежащего по следующей обработке.

Отработанный режим работы реализован в модели второго поколения анализатора — АНП-2. Эта информационно-измерительная система также является совместной разработкой ИЭС им. Е. О. Патона и ИЯИ АН УССР, представляет собой устройство на базе микроЭВМ «Электроника-60М» и крейта КАМАК с набором функциональных модулей. Малогабаритная система АНП-2 отличается от АНП-1 автономностью (имеет встроенную микроЭВМ), улучшенными служебными характеристиками и предназначается для работы не только в лабораторных, но и в заводских условиях (рис. 64) [156, 157]. Все необходимые для обработки информации программы «защиты» в памяти ЭВМ и могут быть вызваны нажатием соответствующих клавиш, что сократило время подготовки системы к работе до нескольких минут (с учетом времени прогрева и контроля работы системы).

Принцип работы системы АНП-2 состоит в следующем (рис. 65). Электрические сигналы (напряжение дуги и напря-

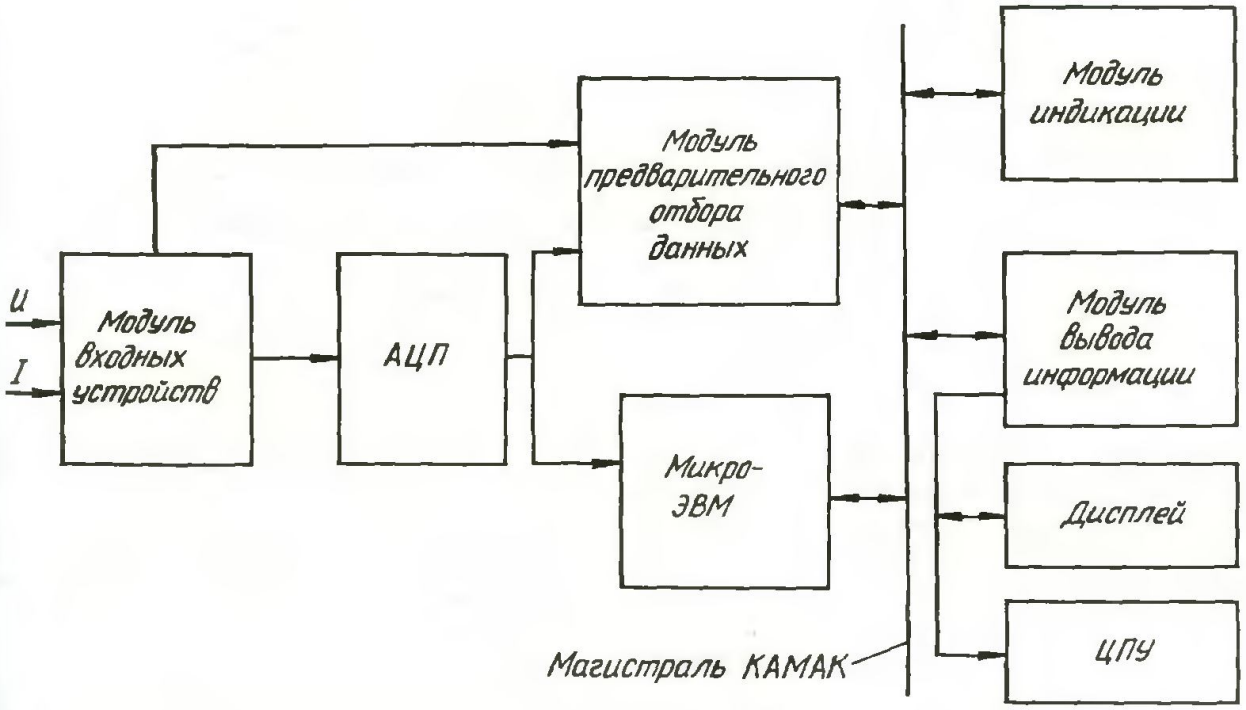


Рис. 65. Блок-схема информационно-измерительной системы АНП-2.

жение, снимаемое с измерительного шунта при измерении тока) поступают во входные устройства системы, где нормируются (усиливаются или ослабляются), измеряются с заданной частотой (квантуются) и преобразуются в цифровую форму (в аналого-цифровом преобразователе). Затем проводится предварительная обработка информации — определение параметров $U_з$, $I_з$, $t_з$, $U_{г.д}$, $U_{к.з}$, $I_д$, $I_{к.з}$, $\tau_{к.з}$, $T_{к.з}$, $N_{к.з}$. После этого информация поступает в ЭВМ, где она накапливается и окончательно обрабатывается в соответствии с заранее введенными в ЭВМ программами обработки. При этом определяются средние значения указанных параметров M, их среднеквадратическое отклонение σ и коэффициент вариации K_v [29, 111]:

$$M = \sum_{i=1}^{n} X_i/n, \qquad (2.16)$$

где X_i — значение случайной величины; n — число измерений;

$$\sigma = \sqrt{(x - M)^2/(n - 1)}. \qquad (2.17)$$

$$K_v = \frac{\sigma}{M} \cdot 100\ \%. \qquad (2.18)$$

Коэффициент вариации — это безразмерный показатель, и им удобно пользоваться, когда анализируются гистограммы параметров, имеющих разные единицы измерения.

Обработанная информация выводится на цифровое табло (средние значения, среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации измеряемых параметров), на экран дисплея (фрагменты кривых тока и напряжения, гистограммы параметров) и на цифропечатающее устройство (таблицы, графики, гистограммы). В ЭВМ вычисляется также параметр $U_{х.х}^{мин}$ по формуле (2.15).

Для удобства работы с системой во время сварки на экране дисплея отображается кривая напряжения дуги, т. е. дисплей работает в режиме цифрового осциллографирования.

Время измерения указанных параметров не ограничено, но, как правило, не превышает 20—40 с. Обработка информации осуществляется в реальном масштабе времени. Общее время эксперимента от начала измерения до окончания вывода результатов составляет не более 50—60 с.

Измерение напряжения дуги и тока сварки может осуществляться с частотой от 100 Гц до 20 кГц. При сварке на переменном токе дополнительно измеряются в каждый полупериод значения $U_д$ и $I_{св}$.

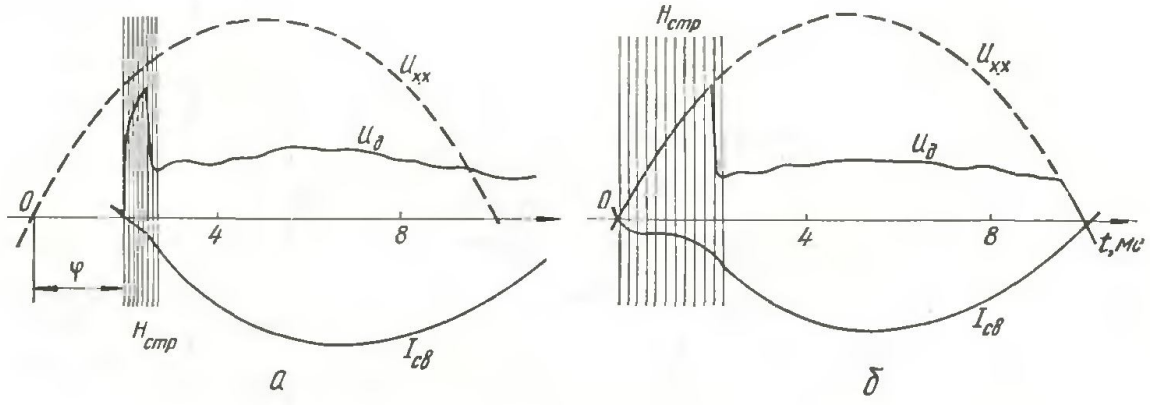


Рис. 66. Выбор частоты стробирования (измерения) напряжения в зависимости от формы кривой:

а — трансформатор с индуктивностью в цепи; *б* — трансформатор без индуктивности в цепи, ток регулируется балластным реостатом. Показаны характерные зависимости $U_д = f(t)$ для электродов с основным покрытием.

Построение гистограмм параметров, вычисление их средних значений и характеристик рассеяния проводится на основании 100 000—200 000 измерений.

В аппаратуре реализован следующий алгоритм определения параметров $U_з$, $I_з$ и $t_з$. Анализируя форму кривых напряжения $U_д$ и тока $I_{св}$, система находит момент смены полярности. С этого момента начинается измерение указанных параметров с заданной частотой (10—20 кГц). Повторное зажигание фиксируется тогда, когда выполняется условие

$$U_i - U_{i+1} \geqslant 0, \qquad (2.19)$$

где U_i, U_{i+1} — два последовательных измерения напряжения дугового промежутка. При этом напряжение U_i принимается в качестве напряжения повторного зажигания $U_з$, а измеренное вместе с ним значение тока — в качестве тока повторного зажигания $I_з$. Время от момента смены полярности до повторного зажигания является временем повторного зажигания дуги $t_з$.

Локальные кратковременные изменения напряжения, не связанные с моментом повторного зажигания, могут также привести к выполнению условия (2.19) и к ошибочному определению параметров $U_з$, $I_з$ и $t_з$. Чтобы этого не случилось, необходимо либо использовать фильтры на базе R — C-ячеек для «сглаживания» кривой напряжения, либо регулировать частоту стробирования $H_{стр}$. Первый путь нежелателен, так как при этом возможно «сглаживание» самого пика напряжения зажигания, т. е. уменьшение его действительного значения. Второй способ — регулирование частоты $H_{стр}$ — предпочтительнее. Так, при быстропротекающих процессах повторного зажигания (например, повторное зажигание при использовании трансформатора с индуктивностью в цепи) частота $H_{стр}$ должна быть в пределах 20—30 кГц (рис. 66, *а*), а при использовании трансформатора, у которого дроссель заменен балластным реостатом (для более четкого определения параметров повторного зажигания), достаточна частота $H_{стр} = 10$—15 кГц (рис. 66, *б*). При этом погрешность измерения напряжения $U_з$ в обоих случаях составит не более 5 %.

Относительно небольшая погрешность измерения напряжения в случае использования трансформатора с индуктивностью в цепи, когда время $t_з$ относительно невелико, обусловлена характером изменения напряжения до момента повторного зажигания. Из осциллограммы, приведенной на рис. 66, *а*, видно, что на кривой напряжения перед моментом повторного зажигания имеется участок замедленного роста. Это уменьшает разницу между значениями U_i и U_{i+1} и в конечном счете погрешность измерения напряжения $U_з$.

Алгоритм определения длительностей $\tau_{к.з}$ и $T_{к.з}$ состоит в следующем. Напряжение дуги, подаваемое на вход системы, измеряется с частотой $H_{стр} = 10$ кГц. При понижении напряжения $U_д$ ниже заранее установленного уровня $U_{ур}$ включается счетчик, определяющий длитель-

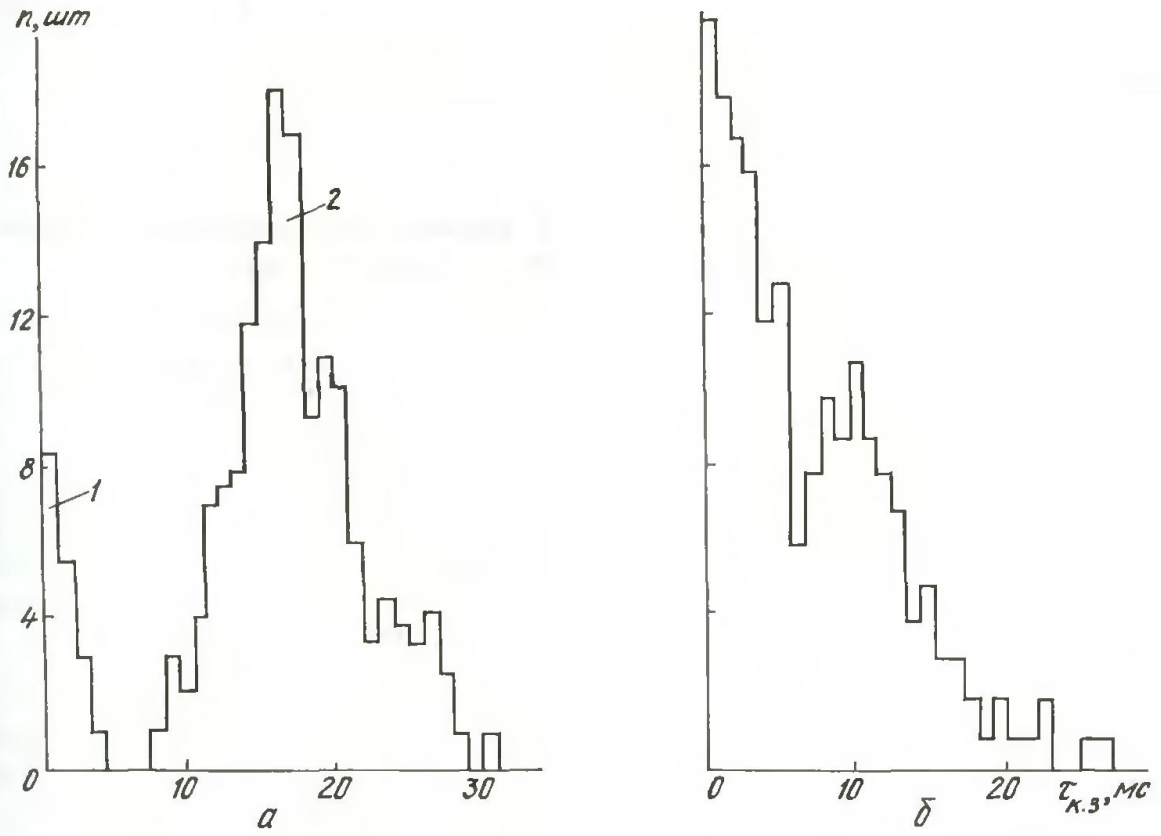


Рис. 67. Типичные гистограммы параметра $\tau_{к.з}$ при сварке покрытыми электродами ($d_э = 4$ мм):
а — с разделением на случайные (*1*) и действительные (*2*) виды короткого замыкания (электроды УОНИ-13/55, $I_{св} = 110$ А, обратная полярность); *б* — без разделения (электроды АНО-4, $I_{св} = 160$ А, обратная полярность)

ность $\tau_{к.з}$. При повышении напряжения $U_д$ выше уровня $U_{ур}$ отсчет $\tau_{к.з}$ прекращается, включается счетчик, измеряющий время $T_{к.з}$, который прекращает свою работу, когда $U_д$ вновь станет меньше $U_{ур}$, и т. д.

Уровень напряжения $U_{ур}$ устанавливается на основе экспериментальных данных о значении $U_{к.з}$. Так, для электродов с нелегированным стержнем $U_{к.з} = 2...5$ В, а в случае использования электродов с легированным стержнем $U_{к.з} = 7...8$ В из-за того, что удельное электрическое сопротивление легированного металла выше. Поэтому напряжение $U_{ур}$ для первого случая должно устанавливаться в пределах 7—10 В, а для второго — 9—13 В.

Необходимо иметь в виду, что увеличивать уровень $U_{ур}$ до значений, близких к среднему значению напряжения дуги, нельзя, так как при этом возможны ложные фиксирования КЗ при случайных, незначительных понижениях напряжения $U_д$.

Для точного анализа характера КЗ необходимо результаты измерения параметров $\tau_{к.з}$ и $T_{к.з}$ представлять в виде гистограмм. Как правило, гистограммы $\tau_{к.з}$ двухмодальные (рис. 67, *а*), что говорит о наличии двух видов КЗ: случайных кратковременных, при которых электродный металл не переходит в сварочную ванну (левая часть гистограммы), и КЗ с переходом электродного металла (правая часть гистограммы). Таким образом, эти две части гистограммы $\tau_{к.з}$ относятся к разным явлениям, и поэтому рассматривать их следует раздельно, определяя для каждой из них с помощью метода поэтапной обработки гистограмм средние значения $\tau_{к.з}$ и характеристики рассеяния.

Сравнивая площади различных участков гистограммы, можно оценить вероятность того или иного явления. Например, число случайных КЗ, как правило, меньше числа действительных. Следовательно, случайные касания капель поверхности ванны происходят реже, чем КЗ, сопровождающихся переходом металла.

Необходимость представления результатов измерения длительности КЗ в виде гистограмм обусловлена еще и тем, что определить пороговое значение $\tau_{к.з}$, меньше которого КЗ случайные, а выше — действительные, можно только анализируя форму гистограммы $\tau_{к.з}$. Так, при сварке покрытыми электродами пороговое значение $\tau_{к.з}$ находится в пределах 1,5—3 мс, а при сварке сплошными и порошковыми проволоками в среде CO_2 — 0,5—1,5 мс.

При измерении длительности $\tau_{к.з}$ сварочных материалов, характеризующихся мелкокапельным переносом металла, возможно получение гистограммы этого параметра, на которой нет четко выраженной границы между случайными и действительными КЗ (рис. 67, *б*). В этом случае раздельное рассмотрение левой и правой частей гистограммы $\tau_{к.з}$ не представляется возможным.

Информационно-измерительная система АНП-2 может быть использована для анализа любых других процессов, параметры которых могут быть представлены в форме электрических сигналов. В частности, для анализа стабильности дуги постоянного тока и факторов, влияющих на нее, в системе АНП-2 реализован универсальный режим статистической обработки напряжения дуги и тока сварки, позволяющий представлять информацию в виде гистограмм $U_д$ и $I_{св}$. Значения $U_д$ и $I_{св}$ измеряются с частотой квантования (до 20 кГц).

Основные технические данные системы АНП-2:

Число входов (напряжение и ток)	2
Число делений шкалы по каждому из измеряемых параметров	256
Диапазон измеряемых напряжений:	
по входу U, В	0—64 (0,25 В/дел)
	0—128 (0,5 В/дел)
по входу I, мВ	0—12,8 (0,05 мВ/дел)
	0—128 (0,5 мВ/дел)
Диапазон измеряемых длительностей, мс:	
КЗ	0—64 (0,25 с/дел)
интервал между КЗ	0—1280 (5 мс/дел)
преддуговой период	0—6,4 мс (0,025 мс/дел)
Частота квантования (измерения), кГц	0,1; 1; 10; 20

3. Влияние составляющих покрытия на стабильность дуги

Фториды. Фтористый кальций (плавиковый шпат, флюоритовый концентрат) является компонентом, определяющим целый ряд специфических свойств электродов основного вида.

Дестабилизирующее действие фтора при сварке электродами этого вида, объясняемое обычно обеднением плазмы токоносителями вследствие захвата электронов фтором (см. первую главу), по-видимому, связано и с так называемым «отравлением» эмиттирующей поверхности катода (пленки шлака). Это явление объясняется образованием запирающего поля, образующегося при адсорбции на катоде электроотрицательных атомов кислорода или галогенов.

По имеющимся данным дестабилизирующее действие фтора прямо пропорционально его количеству. На рис. 68 представлены данные Л. Г. Шафранского и А. В. Абрашина [215] о влиянии соотношения мрамор — плавиковый шпат на скорость деионизации межэлектродного промежутка. Видно, что сопротивление промежутка $R_п$ возрастает с увеличением количества CaF_2 в электродном покрытии. Аналогичные данные получены И. Тсубои и Х. Сасаки [314]. Число обрывов дуги (рис. 69) находится в прямой зависимости от количества фтора, однако зависит также от состава фторида. Так, присутствие натрия в Na_3AlF_6 способствует некоторому улучшению стабильности дуги по сравнению с CaF_2 (количество фтора в этих соединениях практически одинаково).

Большое влияние на дестабилизирующее действие фтора могут оказывать также различные соединения и оксиды, входящие в состав флюса, покрытия. Так, по данным Е. И. Лейначука [95] стабилизирующие свойства флюса типа ОСЦ-45 (8 % CaF_2) одинаковы при введении 1 % калия в виде карбоната и 3 %

калия в виде силиката (рис. 70). Автор объясняет это образованием газообразного соединения SiF_4, ухудшающего стабильность горения дуги.

Фтористый кальций может взаимодействовать также с TiO_2, ZrO_2 в покрытии с образованием летучих при высоких температурах фторидов. Сравнительные испытания 32 марок электродов основного вида отечественного и зарубежного производства, проведенные авторами настоящей работы (рис. 71), позволили установить зависимость стабилизирующих свойств электродов от содержания CaF_2 в шлаках. Некоторый разброс данных связан с влиянием SiO_2, TiO_2, $K_2O \times \times nSiO_2$, $Na_2O \cdot nSiO_2$, содержащихся в различных количествах в покрытиях исследовавшихся электродов.

Взаимное влияние основных газошлакообразующих компонентов покрытия изучали на примере тройных систем $CaCO_3$ — CaF_2 — TiO_2 и $CaCO_3$ — CaF_2 — SiO_2. В соответствии с G-оптимальным планом эксперимента на симплексе [68] для исследований изготовлялись две серии опытных электродов (по 21 варианту) диаметром стержня 4 мм, толщиной покрытия 6,4 мм. В покрытии содержалось только три компонента: плавиковый шпат — рутил — мрамор или плавико-

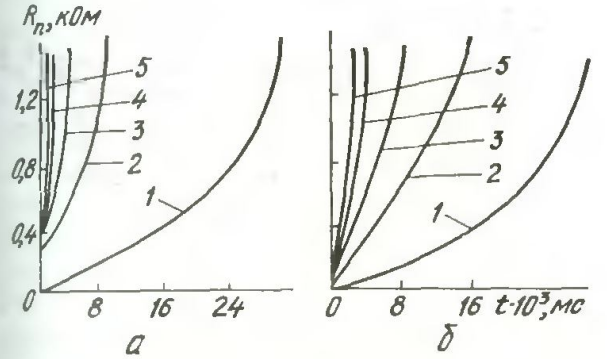


Рис. 68. Зависимость сопротивления межэлектродного промежутка от времени, отсчитываемого после гашения дуги при сварке на прямой (*а*) и обратной (*б*) полярностях и содержании CaF_2 в электродах:

1 — 0 %; *2* — 10 %; *3* — 20 %; *4* — 30 %; *5* — 40 % [215]

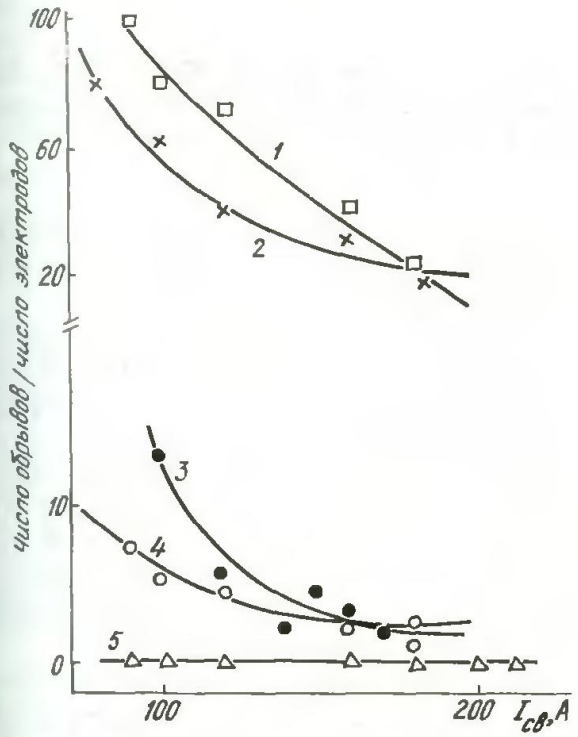


Рис. 69. Зависимость числа обрывов дуги от величины $I_{св}$ при сварке электродами с покрытием содержащим различные фториды:

1 — 8,2 CaF_2; *2* — 8 % Na_3AlF_6; *3* — 7,8 % $CaCO_3$ и 3,5 % CaF_2; *4* — 4,2 % Na_3AlF_6; *5* — 16,4 % $CaCO_3$ или 33,4 % $MnCO_3$ [314].

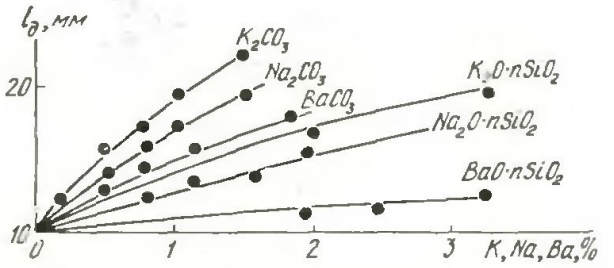


Рис. 70. Зависимость разрывной длины дуги $l_д$ при сварке под флюсом типа ОСЦ-45 при введении во флюс карбонатов и силикатов калия, натрия и бария [95].

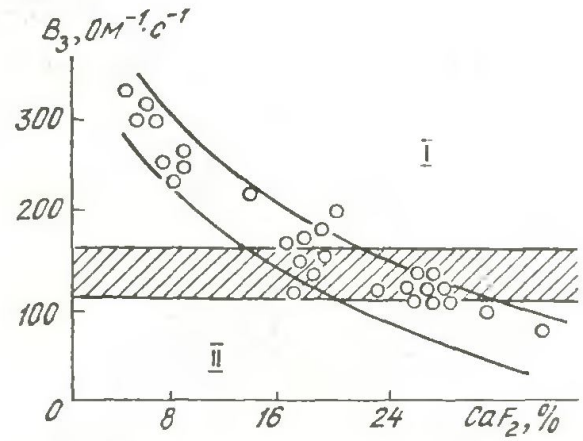


Рис. 71. Зависимость стабильности дуги от содержания CaF_2 в шлаках электродных покрытий при сварке промышленными электродами отечественного и зарубежного производства $I_{св}$ = = 170 А):

I — стабильное горение дуги; *II* — обрывы дуги.

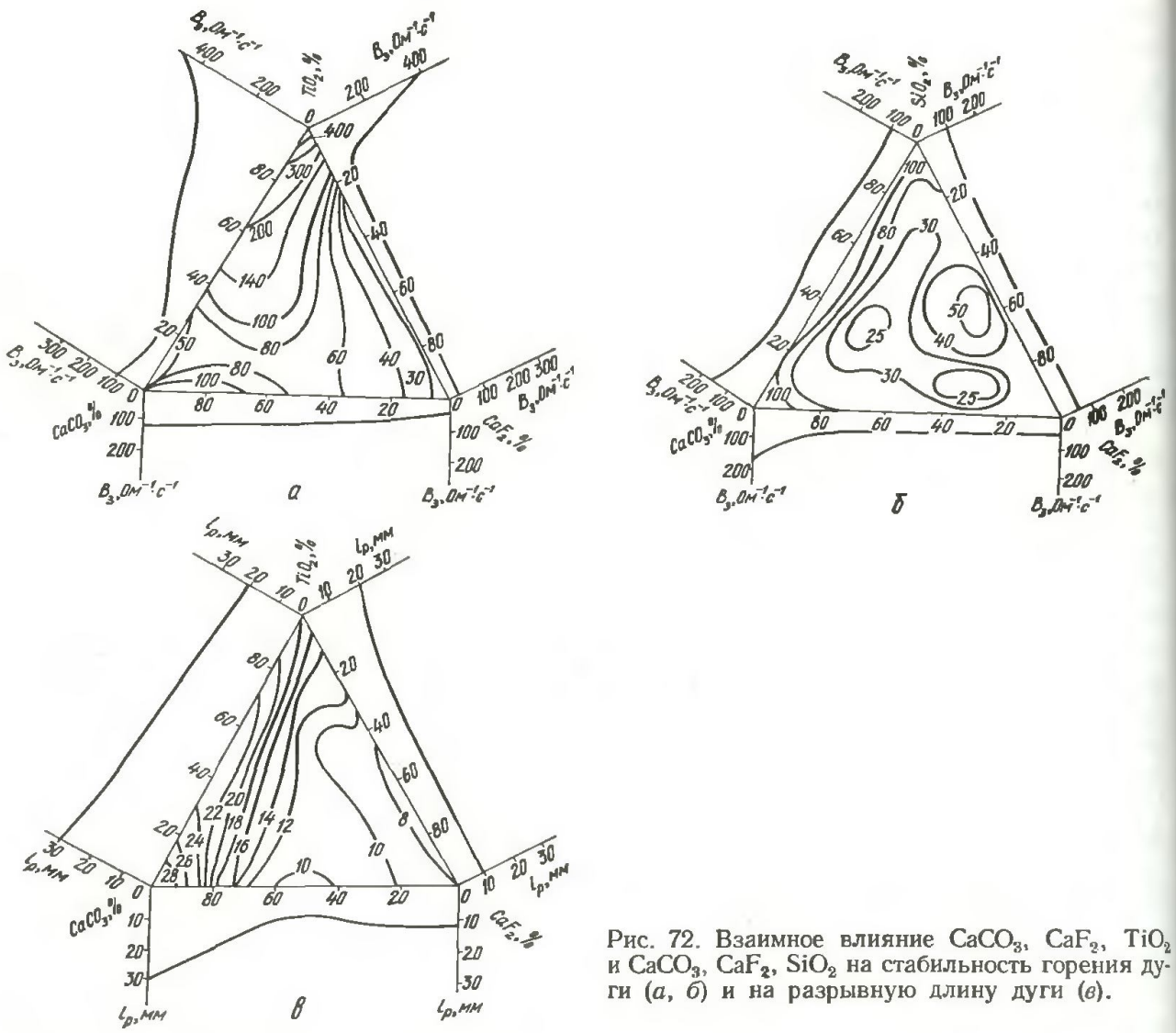


Рис. 72. Взаимное влияние $CaCO_3$, CaF_2, TiO_2 и $CaCO_3$, CaF_2, SiO_2 на стабильность горения дуги (*а*, *б*) и на разрывную длину дуги (*в*).

вый шпат — кварцевый песок — мрамор. В качестве связующего использовали натриевое жидкое стекло в количестве 25 % от массы шихты во всех вариантах электродов. Источник питания — трансформатор СТШ-500/80, $I_{св}$ = 180 А [34, 162, 293]. По результатам эксперимента с помощью ЭВМ строились тройные диаграммы изостабильности горения дуги.

На рис. 72, *а*, *б* представлены кривые равной стабильности для указанных систем (содержание компонентов покрытий приведены в молярных долях). Для удобства отображения информации на боковых сторонах диаграмм приведены данные о стабильности для бинарных систем.

Рассмотрим систему $CaCO_3$ — CaF_2. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными и экспериментальными данными [104]. С увеличением содержания CaF_2 в покрытии стабильность дуги уменьшается.

Из практики известны очень высокие стабилизирующие свойства покрытий рутиловых электродов, что также хорошо согласуется с результатами наших экспериментов: электроды со 100 % TiO_2 в покрытии обладают самой высокой стабильностью (B_3 = 450 Ом$^{-1}$ · с$^{-1}$). Однако, как следует из опытов, в присутствии CaF_2 стабилизирующие свойства TiO_2 резко ухудшаются.

При содержании 10 % CaF_2 стабильность дуги снижается в 2 раза, а при 20 % CaF_2 уменьшается до значений B_3 = 20 Ом$^{-1}$ · с$^{-1}$ и остается на этом уровне во всем диапазоне увеличения молярной доли CaF_2 до 100 %. В то же время в системе $CaCO_3$ — CaF_2 такой эффект

не наблюдается. Особые аномалии в изменении стабильности дуги не отмечаются также в системе $CaCO_3$ — TiO_2. Обращает на себя внимание и то, что мрамор, считающийся достаточно хорошим стабилизатором, существенно уступает по этому признаку рутилу. Здесь, очевидно, сказывается тот факт, что несмотря на более низкую работу выхода электронов у высокоосновных шлаков по сравнению с кислыми [41, 144], выделяющийся при диссоциации мрамора углекислый газ вызывает контрагирование плазмы [191] и, естественно, при этом ухудшаются условия повторного зажигания дуги.

Резкое снижение стабилизирующих свойств электродов, содержащих в покрытии TiO_2, при введении CaF_2 может быть связано с образованием газообразного (при относительно низких температурах) соединения TiF_4 [108].

Данные о взаимном влиянии $CaCO_3$ и TiO_2 на стабильность дуги подтверждаются результатами опытов, проведенных с целью определения разрывной длины дуги $l_р$ по методике К. К. Хренова [209]. Эксперименты проводились на тех же электродах на постоянном токе прямой полярности. Результаты измерений приведены на рис. 72, *в*. Видно, что разрывная длина дуги наибольшая у электродов со 100 % $CaCO_3$. По нашему мнению, при таком значительном удлинении дуги парциальное давление CO_2 в межэлектродном промежутке сильно уменьшается из-за разбавления окружающим воздухом, степень контрагирования плазмы снижается, т. е. создаются условия для существования более устойчивого разряда.

Важное значение имеет и вид переноса электродного металла, от которого зависит характер процесса повторного зажигания дуги. Известно [97], что в момент короткого замыкания и последующего перетекания крупных электродных капель в значительной степени снижается температура торца электрода и плазмы, что приводит к уменьшению эмиссионного тока и сокращению времени существования остаточной плазмы. Поэтому повторное зажигание дуги при смене полярности после КЗ затрудняется либо вовсе не происходит, и нарушается нормальный процесс сварки. При мелкокапельном переносе расплавленного металла величина термоэмиссионного тока после погасаний дуги в различных полупериодах испытывает значительно меньшие колебания.

В системе SiO_2 — CaF_2 (см. рис. 72) с увеличением содержания SiO_2 в покрытии стабильность дуги уменьшается. Известно [144], что SiO_2 повышает работу выхода электронов, снижая тем самым эмиссию их с катода, что может вызвать увеличение напряжения дуги.

В системе SiO_2 — CaF_2 при содержании 20 % CaF_2 показатель стабильности дуги уменьшается в 2 раза, а при содержании CaF_2 свыше 25 % — до значений $B_э = 25...30$ $Ом^{-1} \cdot с^{-1}$ и остается на этом уровне во всем диапазоне изменения содержания от 25 до 100 %.

Обращает на себя внимание, что в трехкомпонентной системе $CaCO_3$ — CaF_2 — SiO_2 имеется значительная область составов, которым соответствует низкая стабильность дуги ($B_э = 25...30$ $Ом^{-1} \cdot с^{-1}$). По-видимому, в области составов, обусловливающих низкие стабилизирующие свойства дуги, усиливается взаимодействие CaF_2 и SiO_2 с образованием газообразных фторидов. Образующиеся при взаимодействии с CaF_2 отрицательные ионы типа TiF_n^- и SiF_n^- приводят, как показано выше, к созданию нескомпенсированного отрицательного объемного заряда у поверхности электрода, на котором в новом полупериоде формируется катод. Наличие такого заряда препятствует выходу электронов из катода, а следовательно, их поступлению в межэлектродный промежуток, что вызывает ухудшение условий повторного зажигания дуги [171, 172].

Титан и его оксиды. В первой главе показано, что шлаки электродов, содержащих в покрытии ферротитан, обладают низкой работой выхода. Для экспериментального подтверждения гипотезы о возможном влиянии термоэмиссионных свойств шлаков на стабильность дуги проведены исследования с тремя сериями электродов (серии А, Т и ЛТ), содержащими в покрытии эквивалентное по титану количество рутила и ферротитана.

Таблица 7. **Состав покрытия электродов серий А и Т, % (по массе)**

Составляющая покрытия	113	Серия А				Серия Т			
		114А	115А	116А	117А	114Т	115Т	116Т	117Т
Плавиковый шпат	25	21	17	13	9	21	17	13	9
Рутил	—	4	8	12	16	—	—	—	—
Ферротитан	—	—	—	—	—	6,5	13	19,5	26
Железный порошок	16	16	16	16	16	13,5	11	8,5	6

Примечание. Остальные компоненты: мрамор 25 %, синтетическая слюда 10 %, ферросилиций ФС-15 го 20 %, ферромарганец 4 %.

Таблица 8. **Химический состав шлаков, полученных при расплавлении электродов серий А и Т, % (по массе)**

Электрод	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$CaO + MgO$	CaF_2	K_2O	Na_2O	MnO	TiO_2
				Серия с рутилом					
114А	20,40	1,86	3,22	25,59	25,71	2,37	3,16	4,41	4,15
115А	23,09	0,82	3,50	26,15	23,55	2,24	2,87	4,38	13,49
116А	20,57	1,32	3,85	29,25	24,30	2,19	2,90	4,82	14,21
117А	22,90	1,65	3,50	21,09	12,72	2,96	2,70	5,51	21,40
				Серия с ферротитаном					
114Т	22,58	1,15	2,15	28,18	31,02	2,69	2,81	2,57	5,91
115Т	17,03	5,30	1,40	25,98	26,33	2,63	2,77	1,83	11,58
116Т	15,02	7,62	1,33	27,38	21,48	2,05	2,37	1,87	15,81
117Т	15,95	8,03	1,12	33,28	15,62	1,86	2,43	1,35	18,16

Состав покрытий электродов серий А и Т приведен в табл. 7.

Установлено, что сварка на переменном токе электродами серии А (рутил в покрытии) при использовании в качестве источника питания трансформатора с $U_{х.х} = 80$ В сопровождается обрывами дуги. У электродов серии Т (ферротитан в покрытии) стабильное горение дуги на переменном токе, причем стабильность возрастает с увеличением количества ферротитана в покрытии.

Шлаки сравниваемых электродов практически близки по химическому составу (табл. 8), но различаются по структуре. Шлаки электродов с рутиловым покрытием в основном аморфны. В шлаках покрытий, раскисленных ферротитаном, наблюдаются соединения с оксидами титана типа Ti_6O_{11}, Ti_5O_9. Это косвенно подтверждается также голубым цветом наиболее раскисленных шлаков (117Т). По данным [27], такие оксиды синего цвета.

Об улучшении стабилизирующих свойств покрытий, содержащих ферротитан вместо рутила, свидетельствуют начальные участки осциллограммы тока и напряжения до момента зажигания (усреднение по данным измерений 50—60 полупериодов) (рис. 73, 74). Видно, что при замене в покрытии фтористого кальция ферротитаном (серия Т) наблюдается некоторое снижение напряжения $U_з$, увеличение тока $I_з$ и сокращение времени формирования разряда $t_з$. В электродах с рутилом улучшение процесса зажигания происходит лишь при малых содержаниях фтористого кальция в покрытии (вариант 117А). На рис. 75 показан характер изменения показателя $B_з$ от содержания титана в покрытии в виде TiO_2 и FeTi. Несмотря на уменьшение количества CaF_2 в электродах с рутилом наблюдается некоторое снижение показателя $B_з$ (кривая *1*). В электродах с ферротитаном $B_з$ закономерно увеличивается

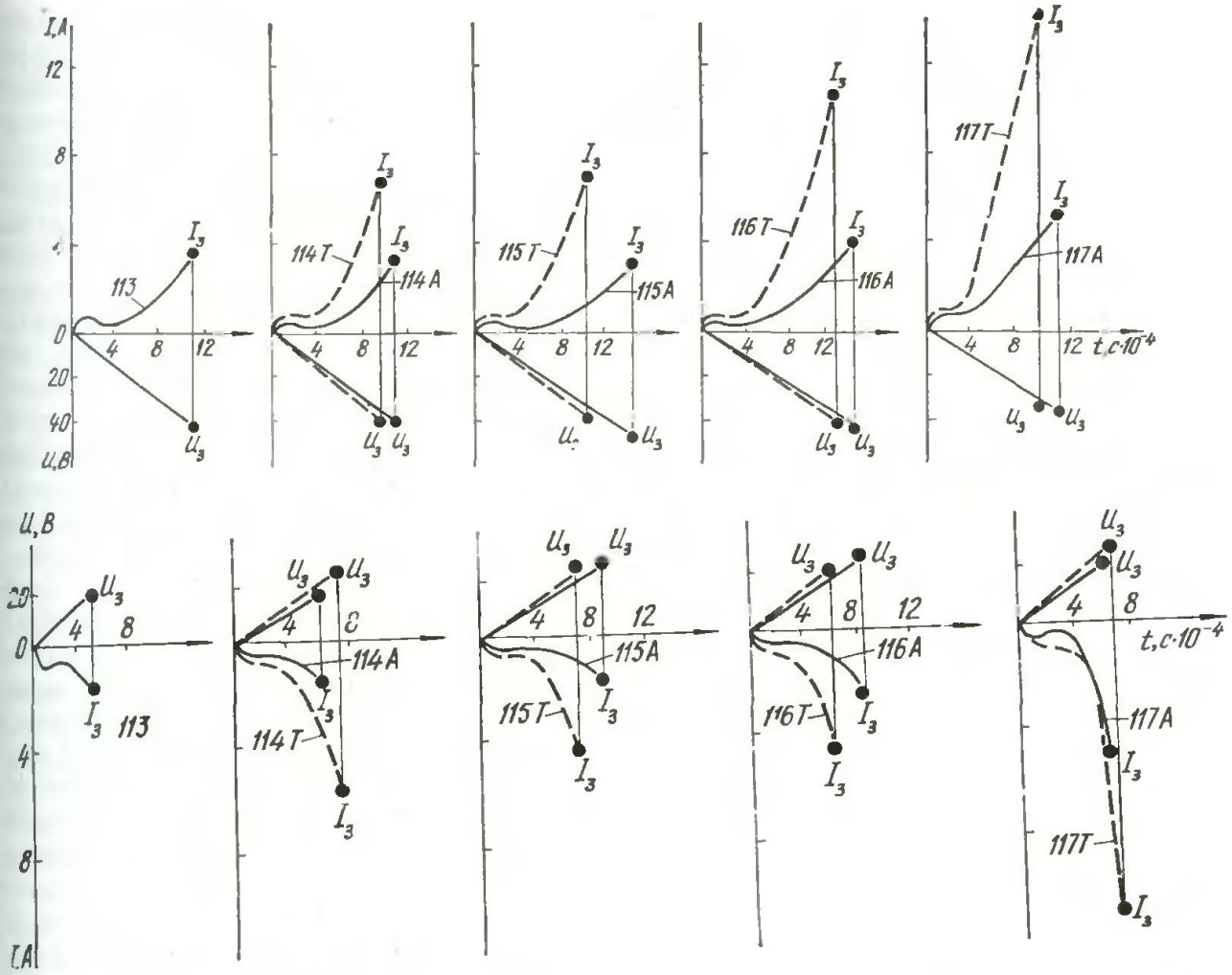


Рис. 73. Характер изменения тока и напряжения после перехода через нуль до момента зажигания при сварке электродами серий 113—117А (сплошные кривые) и Т (штриховые кривые); положительный полупериод (плюс на электроде).

Рис. 74. Характер изменения тока и напряжения после перехода через нуль до момента зажигания при сварке электродами серий 113—117А и Т; отрицательный полупериод (минус на электроде). Обозначения те же, что и на рис. 73.

(кривая 2). Таким образом, дестабилизирующее влияние фтористого кальция существенно усиливается при наличии в электродном покрытии рутила (TiO_2).

Более детально исследование влияния рутила и ферротитана на процесс повторного зажигания проводилось с электродами серии ЛТ (табл. 9), в которых были изъяты ферросилиций и ферромарганец, а количество шлакообразующих компонентов максимально сокращено. Фтористый кальций вводился только в варианты ЛТ-3 и ЛТ-4.

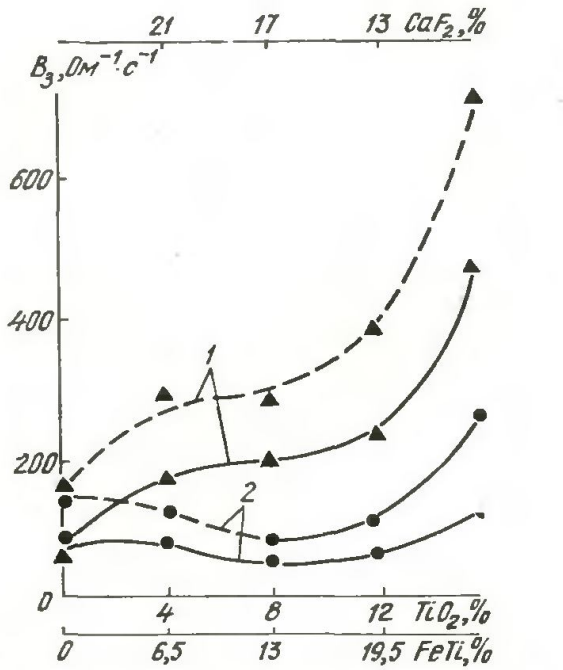


Рис. 75. Зависимость скорости нарастания проводимости межэлектродного промежутка от содержания ферротитана (*1*) и рутила (*2*) в электродах. Сплошные кривые — положительный полупериод, штриховые — отрицательный.

Таблица 9. **Состав покрытия электродов серии ЛТ, % (по массе)**

Составляющая покрытия	ЛТ-1	ЛТ-2	ЛТ-3	ЛТ-4
Мрамор	50	50	40	40
Плавиковый шпат	—	—	10	10
Рутиловый концентрат	20	—	20	—
Кварцевый песок	10	10	10	10
Ферротитан	—	32,5	—	32,5
Железный порошок	20	7,5	20	7,5

Рутил и ферротитан использовались в покрытии в количестве, эквивалентном по содержанию титана. По данным химического анализа (табл. 10) расхождение содержания TiO_2 в полученных при расплавлении электродов шлаках незначительно. Параметры переходных процессов при сварке этими электродами приведены в табл. 11, начальные участки осциллограмм, построенные по средним данным для 60—80 полупериодов,— на рис. 76.

В отсутствие фтористого кальция для электродов с рутилом (ЛТ-1) характерна одинаковая величина B_3 в обоих полупериодах, а для электродов с ферротитаном (ЛТ-2) показатель B_3 в положительном полупериоде больше. Это указывает на то, что ферротитан проявляет себя на ванне, когда реакция раскисления шлака достигает наибольшей полноты. С введением в покрытие фтористого кальция показатель B_3 уменьшается на порядок при сварке электродами с рутилом (ЛТ-3) и в 5 раз при сварке электродами с ферротитаном (ЛТ-4).

Полученные данные подтверждают также, что ферротитан способствует улучшению повторного зажигания дуги при сварке электродами основного вида, в то время как рутил оказывает противоположное действие. Причины этого явления можно объяснить тем, что в случае использования ферротитана эмиссия электронов с поверхности ванны настолько усиливается, что способна значительно ослабить деионизирующее влияние фтористого кальция (см. первую главу). Действие титана в этом случае носит сложный характер. Во-первых, как элемент с большим сродством к кислороду, титан интенсивно раскисляет шлак. чем способствует повышению его основности, а следовательно, и термоэмиссионной способности. Во-вторых, титан при окислении образует целую гамму низших оксидов [27, 40, 48, 4] с очень малой работой выхода (например, для TiO φ = = 2,8 эВ), в связи с чем и шлак, содержащий такие оксиды, должен также обладать более низкой работой выхода.

При визуальном наблюдении ванна при сварке основными электродами свободна от шлака. Но шлак захватывается каплями металла, и пленка его на ванне периодически возникает и все время обновляется. К тому же титан, попадая в металл, интенсивно раскисляет его, а оксиды титана всплывают на поверхность ванны. Кроме того, часть титана переходит в наплавленный металл. По нашим данным, у наплавленного металла с 0,1—0,15 % Ti (электроды 117Т) работа выхода φ = 3,9 эВ, т. е. как у титана. Это также может способствовать повышению эмиссии электронов с поверхности металлической ванны.

При сварке электродами основного вида с рутилом в покрытии описанные выше явления отсутствуют. К тому же рутил (TiO_2) как кислый оксид, наоборот, способствует снижению основности шлака и, естественно, ухудшению термоэмиссионных свойств. Это предположение согласуется с практикой использований элект-

Таблица 10. **Химический состав шлаков, полученных при расплавлении электродов серии ЛТ, % (по массе)**

Электрод	SiO_2	CaO	CaF_2	TiO_2	FeO_3	K_2O	Na_2O	MgO	MnO
ЛТ-1	27,57	23,70	—	18,45	20,00	0,69	1,48	0,12	2,03
ЛТ-2	23,36	39,20	—	21,16	2,00	0,52	1,73	0,24	0,70
ЛТ-3	21,09	23,77	8,01	21,80	25,00	0,32	1,41	0,16	2,18
ЛТ-4	23,13	29,17	11,41	23,90	2,34	0,44	2,24	0,25	0,68

родов УОНИ-13, которые содержат в покрытии 15 % ферротитана, но также и 9 % кварцевого песка (SiO_2). Как известно, на переменном токе эти электроды использоваться не могут.

Цирконий, марганец, кремний и их оксиды. Эксперименты проводились с электродами, изготовленными по тому же принципу, что и предыдущие серии с рутилом и ферротином. Варианты Ц-1, Ц-2, М-1, М-2, СК-1 и СК-2 композиционно аналогичны вариантам 115А и 115Т (табл. 12). Цирконий, марганец и кремний вводились в покрытие в виде ферросплавов и оксидов ZrO_2, MnO_2 и SiO_2 в количестве, обеспечивающем эквивалентное содержание основного элемента. Результаты исследований приведены в табл. 13.

Установлено, что, как и в опытах с электродами, содержащими титан в виде ферросплава и высшего оксида, здесь имеют место те же тенденции, а именно: при сварке электродами Ц-1, М-1, СК-1 с ферросплавами в покрытии дуга горит на переменном токе ($U_{х.х} = 80$ В) достаточно стабильно, без обрывов, а в случае применения электродов Ц-2, М-2 и СК-2 с оксидами этих же элементов дугу трудно зажечь и горение ее можно поддержать лишь несколько секунд.

По результатам статистической обработки осциллограмм построены началь-

Таблица 11. **Влияние рутила и ферротитана на параметры процесса повторного зажигания**

Электрод	$U_з^{ср}$, В	$I_з^{ср}$, А	$t_з^{ср}$, с·10⁻⁴	$B_з$, Ом⁻¹·с⁻¹
Положительный полупериод				
ЛТ-1	38,2	14,0	14,0	252
ЛТ-2	28,8	13,0	9,6	470
ЛТ-3	74,0	3,2	23,0	19
ЛТ-4	40,0	4,0	11,0	91
Отрицательный полупериод				
ЛТ-1	22,0	4,4	7,8	257
ЛТ-2	27,8	4,6	8,8	188
ЛТ-3	28,0	2,3	12,0	69
ЛТ-4	26,0	2,1	8,8	92

Примечание. $I_{св} = 200$ А, $U_{х.х} = 80$ В.

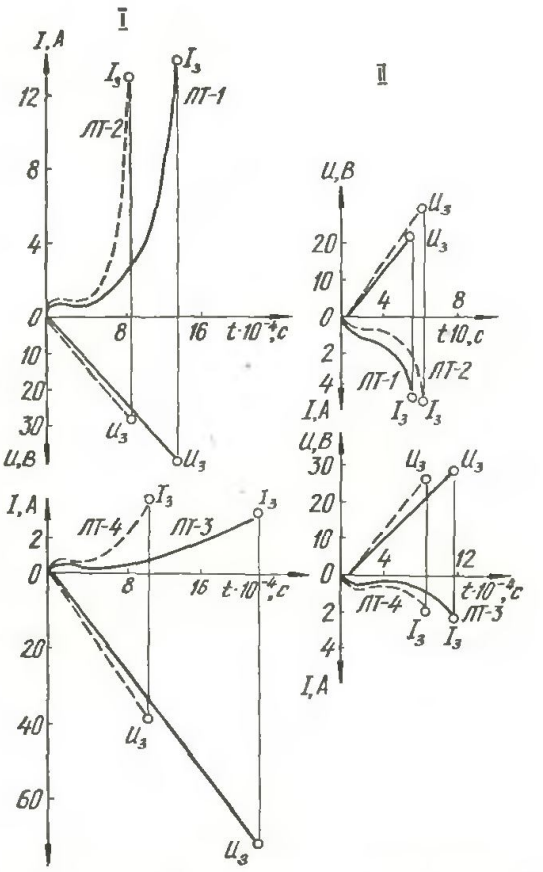


Рис. 76. Характер изменения напряжения и тока после перехода через нуль от момента зажигания при сварке электродами серии ЛТ:
I — положительный полупериод; *II* — отрицательный.

ные участки развития дугового разряда после перехода тока через нуль до момента зажигания (рис. 77). На каждом участке нанесены кривые нарастания тока и напряжения одновременно для электродов с исследуемым металлом и его оксидами, что облегчает сопоставление сравниваемых вариантов.

У всех электродов с ферросплавами зарегистрирован больший по величине показатель $B_з$, т. е. бóльшие токи зажигания и скорость их нарастания и, соответственно, меньшее напряжение зажигания (табл. 13). Это указывает на лучшие стабилизирующие свойства электродов с покрытием, содержащим активные раскислители и, как видно, носит закономерный характер.

Состав электродного металла. На основании результатов, изложенных выше, можно утверждать, что одним из факторов, определяющих процесс повторного зажигания дуги при сварке плавящимся электродом, является эмиссионная спо-

Таблица 12. **Состав покрытия электродов с ферросплавами циркония, марганца и кремния и их оксидами, % (по массе)**

Составляющая покрытия	Ц-1	Ц-2	М-1	М-2	СК-1	СК-2
Мрамор	25	25	25	25	25	25
Плавиковый шпат	17	17	17	17	17	17
Ферросилиций ФС-15гс	20	20	20	20	—	—
Железный порошок	11	18,5	18	13	24	25
Ферромарганец	4	4	10	—	4	4
Диоксид маганца	—	—	—	15	—	—
Синтетическая слюда	10	10	10	10	10	10
Ферроцирконий	13	—	—	—	—	—
Ферросилиций ФС-45	—	—	—	—	20	—
Диоксид циркония	—	5,5	—	—	—	—
Кварцевый песок	—	—	—	—	—	19

Таблица 13. **Параметры зажигания дуги при сварке электродами с ферросплавами циркония, марганца и кремния и их оксидами**

Электрод	Ферросплав	Полярность на электроде	$U_з^{ср}$, В	$I_з^{ср}$, А	$t_з^{ср}$, с·10^{-4}	$B_з$, Ом$^{-1}$·с$^{-1}$
Ц-1	FeZr	+	48	4,2	12,6	79,5
		—	22	2,4	6,5	168
Ц-2	ZrO_2	+	56	2,4	16	27
		—	20	1,4	6	117
М-1	FeMn	+	50	3,5	14,2	49
		—	18	1,8	5,6	179
М-2	MnO_2	+	62	2,8	18,7	24
		—	34	1,3	10,6	36
СК-1	FeSi	+	48	3,8	12,6	63
		—	15	1,8	4	300
СК-2	SiO_2	+	57	2,0	16	22
		—	30	1,5	9	56

собность торца электрода и поверхности сварочной ванны, зависящей от температуры расплавленного металла и покрывающего его шлака, а также от работы выхода электронов из них.

Полученные данные дополнены экспериментами при сварке электродами с покрытием и без него по стальной пластине, а также по пластинам из титана, циркония и ниобия, (табл. 14, рис. 78). Процесс формирования катода наиболее затруднен при сварке стальным стержнем Св-08А по стальной пластине ($U_з$ имеет наибольшее значение, а $B_з$ — наименьшее). При замене пластины из стали металлом с меньшими значениями работы выхода электронов (титан, цирконий), напряжение зажигания дуги в положительном полупериоде становится даже меньше, чем в отрицательном. Аналогичный результат получен и при сварке покрытым электродом УОНИ-13. Замена пластины на встречно горящий электрод также приводит к устранению асимметрии по значениям $U_з$, несмотря на то что в этом случае следует ожидать больших концентраций фтора и его соединений в межэлектродном промежутке. Полученные результаты, на наш взгляд, свидетельствуют о снижении напряжения повторного зажигания дуги из-за увеличения эмиссионной способности свариваемого металла.

Одним из средств влияния на характеристики повторного зажигания дуги переменного тока и повышения стабильности дуги постоянного тока может быть введение тех или иных элементов в состав

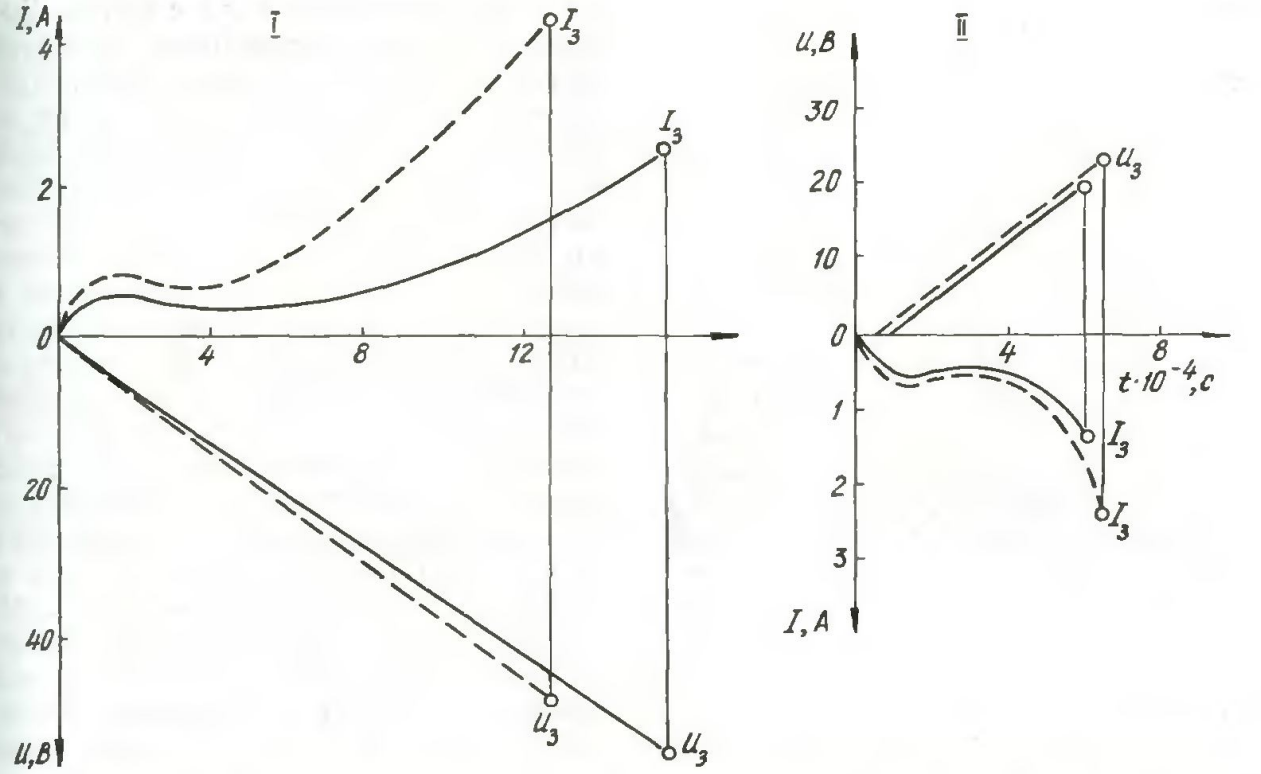


Рис. 77. Характер изменения напряжения и тока после перехода через нуль до момента зажигания. Сплошные кривые — электроды Ц-2 с диоксидом циркония ($ZrO_2 + CaF_2$), штриховые — Ц-1 с ферроцирконием ($FeZr + CaF_2$).

Таблица 14. **Влияние электродных материалов на периметры повторного зажигания и горения дуги**

Электрод	Материал пластины или заменяющий ее электрод	Полярность на электроде	$U_з^{ср}$, В	$I_з^{ср}$, А	$t_з^{ср}$, с·10—3	$U_д^{ср}$, В	$B_з$, Ом—1·с—1
Св-08А	Сталь Ст3	+	63,5	10,8	1,40	30,0	121
		—	45,4	10,2	1,10	30,5	204
	Титан	+	40,4	11,2	1,04	25,2	277
		—	49,9	13,7	1,13	30,8	249
	Цирконий	+	40,4	9,2	0,95	24,4	240
		—	44,8	12,4	0,99	28,8	280
УОНИ-13/55	Сталь	+	49,8	11,5	1,16	27,3	144
		—	31,4	9,4	0,74	27,0	404
	Титан	+	21,5	9,5	0,61	23,4	713
		—	23,2	10,5	0,64	26,5	707
	Цирконий	+	21,4	9,9	0,62	23,0	766
		—	22,4	11,6	0,65	26,7	754
	Ниобий	+	22,0	10,3	0,62	23,8	755
		—	25,8	11,0	0,63	27,2	677
	УОНИ-13/55 **	+	25,0	9,7	0,74	30,6	524
		—	26,3	11,2	0,72	31,6	591
	Св-08А **	+	46,8	10,5	1,11	30,8	209
		—	34.6	8,5	0,72	31,4	341

* $I_{св} = 200$ А, $U_{х.х} = 135$ В

** Встречно горящие электроды.

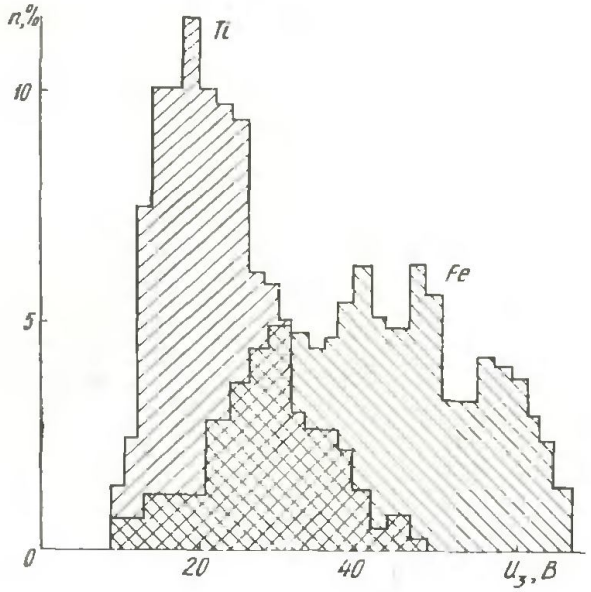


Рис. 78. Гистограммы напряжения зажигания дуги в положительном полупериоде при сварке электродами УОНИ-13/45 по пластинам из титана и стали ($U_{х.х} = 135$, В. $I_{св} = 220$ А).

проволоки и электродного стержня. Были изготовлены порошковые проволоки диаметром 4 мм, сердечники которых состояли из железного порошка, ферроциркония и лигатур, содержащих барий и церий. Результаты измерений параметров повторного зажигания дуги при сварке непокрытыми трубчатыми электродами из этих проволок приведены в табл. 15. Для сравнения здесь приведены также данные, полученные при сварке стержнем Св-08А. Видно, что введение бария, церия и циркония позволяет очень сильно уменьшить напряжение повторного зажигания дуги. Эти результаты подтверждены и в экспериментах с серией опытных проволок сплошного сечения, состав которых дан в табл. 16.

Результаты измерений параметров повторного зажигания, полученные при сварке непокрытыми стержнями диаметром 4 мм, изготовленными из этих прово-

Таблица 15. **Параметры повторного зажигания дуги при сварке непокрытыми трубчатыми электродами и стержнем из стали Св-08А**

Материал стержня, электрода	Полярность на электроде	$U_з^{ср}$, В	$I_з^{ср}$, А	$t_з^{ср}$, с·10⁻³	$B_з$, Ом⁻²·с⁻¹
Железный порошок	+	47,8	5,4	1,8	63
	—	32,1	8,7	2,5	108
Циевая лигатура	+	23,4	4,9	0,72	291
	—	19,6	4,2	0,67	320
Бариевая лигатура	+	21,2	4,6	0,6	361
	—	18,4	3,8	0,52	397
Ферроцирконий	+	42,6	6,5	1,6	95
	—	26,6	9,4	1,4	252
Св-08А	+	48,7	4,3	2,4	37
	—	34,5	6,5	2,2	86

Примечание. $I_{св} = 180$ А, $U_{х.х} = 135$ В, $U_д = 30$ В.

Таблица 16. **Химический состав проволок сплошного сечения и работа выхода электронов, %** (по массе)

Индекс проволоки	C	Si	Mn	Al	Ni	Ba	Zr	Ce	φ, эВ, при $T = 1370$ К
1	0,10	1,06	0,60	—	0,18	—	—	—	4,61
2	0,11	0,42	0,57	0,37	0,23	—	—	—	4,52
3 *	0,10	0,70	1,20	0,07	0,26	0,13	—	—	3,55
4	0,10	0,40	1,40	0,04	0,21	—	0,44	—	3,91
5	0,11	0,98	1,80	0,45	0,20	—	—	0,11	4,15

* Содержание бария указано по результатам химического анализа.

Таблица 17. **Параметры повторного зажигания дуги переменного тока при сварке непокрытыми стержнями из опытных проволок**

Индекс проволоки	$U_з^{ср}$, В	$I_з^{ср}$, А	$t_з^{ср}$, $с^{-3}$	$B_з$, $Ом^{-1} \times с^{-1}$
1	44,0/33,9	4,3/8,4	2,5/2,2	39/113
2	40,0/28,1	4,2/8,4	2,1/1,9	50/157
3	33,4/20,8	8,4/13,8	1,7/1,4	148/474
4	34,8/22,6	7,6/11,4	1,8/1,6	121/315
5	40,1/23,0	8,0/12,6	2,9/3,1	68/177
Св-08А	43,6/28,1	4,1/6,3	2,6/3,0	36/74

Примечания: 1. $U_{х.х} = 135$ В, $U_д = 27$ В, $I_{св} = 180$ А. 2. Перед чертой — данные для положительного полупериода, за чертой — для отрицательного

лок, приведены в табл. 17. Видно, что высокие значения напряжения зажигания получены при использовании в качестве непокрытых электродов проволок 4 и 5, значения работы выхода электронов из которых ниже, чем, например, для проволок 1 и 2. Это можно объяснить тем, что измерения термоэлектронного тока проводятся в вакууме, на очищенных образцах, а сварка ведется в открытой атмосфере. Такое объяснение подтверждено результатами определения работы выхода электронов для образцов, изготовленных при расплавлении проволок 4 и 5 дугой в открытой атмосфере. Полученные таким образом значения φ составили 4,82 эВ для проволоки 4 и 4,68 эВ для проволоки 5 при $T = 1370$ К.

Повышение работы выхода электронов, по-видимому, связано с образованием SiO_2 и Al_2O_3 на поверхности образцов при нагревании в открытой атмосфере, что подтверждает высказанное Г. М. Тиходеевым [104] предположение об отрицательном влиянии этих оксидов на стабильность дуги.

4. Повторное зажигание дуги и эмиссионные свойства шлаков

Эмиссионные свойства поверхности электрода и ванны зависят от температуры и работы выхода расплавленного металла и покрывающего его шлака. Работа выхода металла может быть снижена добавками элементов с более низкой работой выхода и высокой температурой кипения, например титана в количестве до 0,1 %.

Влияние щелочных металлов как элементов, снижающих работу выхода железного катода, в условиях сварки покрытыми электродами маловероятно, так как температура расплавленного металла примерно в 2 раза выше температуры кипения этих соединений.

Эмиссионные свойства шлака улучшаются с повышением основности и степени раскисленности и ухудшаются при наличии фторидов.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с литературными данными (см. первую главу). С увеличением основности шлака работа выхода снижается. Потеря кислорода (раскисление) вызывает повышение основности шлака [54] и также способствует снижению φ.

Эти данные находятся также в полном соответствии с явлениями, известными из теории и практики использования оксидных катодов [196, 202]. Для усиления эмиссионной способности таких катодов, содержащих оксиды CaO, BaO или SrO, их «активируют», т. е. нагревают до высоких температур в присутствии восстановителя (раскислителя). Считают, что такие оксиды нестехиометрического состава с дефицитом кислорода приобретают большое число так называемых донорных центров, в связи с чем плотность тока термоэмиссии увеличивается на несколько порядков.

Адсорбция на оксидном катоде электроотрицательных атомов, особенно галоидов, приводит к образованию двойного электрического слоя, запирающего эмиссию электронов, т. е. к «отравлению» катода.

В литературе по сварке можно найти сведения, подтверждающие положительное влияние раскисления флюсов на стабильность горения дуги. Так, упоминание о том, что раскисление флюса АН-348 в процессе плавки способствует улучшению его стабилизирующих свойств, содержится в работе [181]. Введение 15 % алюминиевого порошка в этот же флюс, как показано в работе [95], увеличивает разрывную длину дуги с 14,4 до 19,5 мм.

В табл. 18 приведены данные Т. Саладжена и С. Боарна [303] по оценке ста-

Таблица 18. **Зависимость критерия А от состава флюса, % (по массе) [303]**

Флюс	SiO_2	MnO	Al_2O_3	$CaCO_3$	CaF_2	FeMn	Критерий А
1	40—45	18—20	—	—	—	—	0,624
2	13	—	23	7	7	50	0,652

Примечание. $I_{св} = 500$ А, $U_{х.х} = 62$ В, $U_д = 30$ В, $d = 3{,}25$ мм

билизирующих свойств флюсов по критерию Бессона. Согласно методике максимальная величина критерия не превышает единицы. Видно, что для фторидного флюса, содержащего ферромарганец, величина А оказывается больше, чем у флюса без CaF_2. Из-за методических трудностей исследование термоэмиссионных свойств шлаков проведено при температурах, не превышающих 1700 К. Однако применяя известное уравнение Ричардсона — Дешмана [45] и используя полученные эмиссионные характеристики шлаков (работу выхода), можно рассчитать ожидаемую плотность тока насыщения для реальных температур (табл. 19), до которых нагревается металл и шлак

Таблица 19. **Термоэмиссионные свойства шлаков и параметры зажигания дуги**

Шлак	Термоэмиссионные свойства шлаков, А/см²			Параметры зажигания дуги	
		T, К			
	φ, эВ	2400	2500	$I_з^+$, А	$B_з$, Ом$^{-1}$ с$^{-1}$
Электроды с оксидами Ti, Zr, Mn, Si					
114А	3,81	5,9	15,0	3,5	82
115А	3,80	6,2	16,2	3,3	51
116А	3,89	4,2	10,8	4,0	69
117А	3,81	5,9	15,0	5,3	123
Ц-2	4,07	1,7	4,8	2,4	27
М-2	4,12	1,3	3,6	2,8	24
СК-2	4,22	0,8	2,2	2,0	22
Электроды с ферросплавами Ti, Zr, Mn, Si					
114Т	3,55	21,4	54,0	6,4	176
115Т	3,40	44,0	115,0	6,9	194
116Т	3,39	47,0	108,0	10,4	232
117Т	3,38	49,0	123,0	14,3	474
Ц-1	3,72	9,3	24,0	4,2	80
М-1	3,80	6,2	16,2	3,5	49
СК-1	3,80	6,2	16,0	3,8	63

Примечание. Составы покрытия электродов приведены в табл. 7 и 12.

на торце электрода и в ванне. Для сравнения в табл. 19 приведены некоторые параметры зажигания дуги — ток зажигания и показатель стабильности. Видно, что величина тока насыщения, рассчитанного для двух возможных температур (2400 и 2500 К), близка к экспериментально полученным значениям тока зажигания $I_з$ или даже выше их. Строгое сопоставление здесь, безусловно, невозможно, справедливо лишь оценить порядок величин и тенденции.

Как следует из приведенных данных, снижение температуры на 100 К приводит к уменьшению тока термоэмиссии более чем в 2 раза. Даже при большой близости температуры в реакционной зоне ванны к температуре торца электрода такую небольшую разницу (100 К) всегда можно ожидать и ее может оказаться достаточно для появления асимметрии в процессах повторного зажигания.

Сопоставление стабилизирующих свойств электродов (показатель $B_з$) и работы выхода шлаков φ указывает на их взаимосвязь (рис. 79): чем ниже работа выхода, тем лучше горит электрод. Здесь следует оговориться, что для оксидных катодов (полупроводниковых) работа выхода φ не является величиной постоянной, она зависит от температуры (с ростом температуры увеличивается). Для исследованных шлаков анализ такой зависимости $\varphi = f(T)$ не проводился. Однако не принималось во внимание также возможное увеличение эмиссионного тока из-за эффекта Шоттки. С учетом последнего под влиянием напряженности поля у катода работа выхода должна снизиться на величину [196]

$$\Delta\varphi = 3{,}8 \cdot 10^{-4} E^{1/2}. \qquad (2.20)$$

Принимая $E = 4{,}3 \cdot 10^7$ В/см, получаем $\Delta\varphi = 0{,}8$ эВ. Такого снижения работы выхода оказывается достаточным,

чтобы плотность тока эмиссии увеличилась в 30—40 раз, а это значит, что, например, при $T = 2400$ К плотность тока насыщения для двух шлаков с худшими и лучшими эмиссионными свойствами (СК-2 и 117 Т) будет соответственно 61 и 2340 А/см^2.

Реально даже в импульсном режиме такие плотности термоэмиссионного тока не получают из-за разрушения оксидного катода.

Максимально достигнутые плотности термоэмиссионного тока составляют 30 А/см^2 [202]. Принимая во внимание, что площадь эмитирующей поверхности в реальной дуге при сварке покрытыми электродами может составлять 0,1—0,2 см^2 (площадь капли), приведенный расчет указывает, что (особенно с учетом непрерывного восполнения шлаковой пленки во время плавления электрода) реальные сварочные шлаки могут обеспечить достаточный для повторного зажигания дуги ток эмиссии.

Хорошо раскисленный шлак не всегда может быть получен, так как количество элементов раскислителей ограничивается их содержанием в наплавленном металле.

Малое содержание CaF_2 в покрытии не

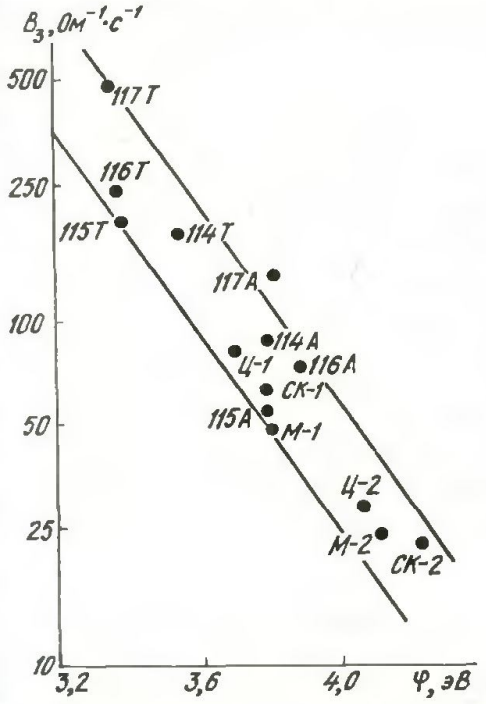


Рис. 79. Взаимосвязь между работой выхода шлаков и стабильностью горения электродов ($U_{х.х} = 80$ В).

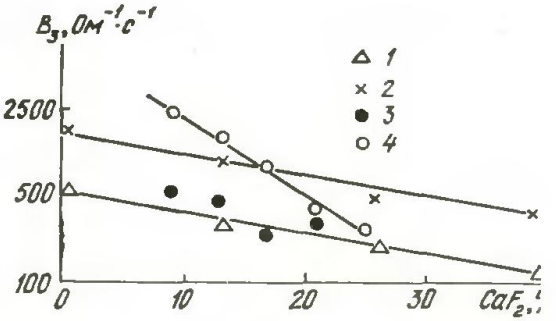


Рис. 80. Эффективность уменьшения дестабилизирующего действия CaF_2 ($U_{х.х} = 135$ В):

1 — сварка электродами с Na_2O; серия Н; *2* — с K_2O, серия К, Т; *3* — TiO_2, серия А; *4* — с FeTi; серия Т.

следует сочетать с кислым шлаком. Для получения достаточно раскисленного шлака желательно, исходя из особенностей композиционного построения данного покрытия, использовать преимущественно вместо кислых оксидов ферросплавы этих же элементов (например, ферротитан вместо рутила, ферросилиций взамен кварцевого песка, ферроцирконий вместо диоксида циркония и т. д.). В наибольшей степени эмиссионные свойства шлака улучшаются при раскислении ферротитаном.

На рис. 80 сведены данные измерений параметров зажигания при сварке электродами четырех серий в зависимости от количества CaF_2 в покрытии. Электроды серии Н изготовлены на натриевом жидком стекле, К — на калиевом. Серии А и Т — на натрий-калиевом стекле (70 % Na_2O и 30 % K_2O) с рутилом и ферротитаном соответственно. Легко убедиться, что при одинаковом содержании CaF_2 в покрытии добавка 13 % ферротитана оказывает стабилизирующее действие, эквивалентное действию калиевого жидкого стекла (около 3 % K_2O), что еще раз свидетельствует о действенности предложенной гипотезы. При использовании меньшего количества ферротитана следует применять калиево-натровое жидкое стекло (70 % K_2O и 30 % Na_2O).

Сопоставление экспериментальных данных по влиянию раскислителей и кислых оксидов на условия зажигания дуги и эмиссионные свойства шлаков указывает на их взаимосвязь. Расчет величины вероятной плотности тока термоэмиссии при реальных температурах (2400 и

2500 К) хорошо совпадает по порядку с величиной измеренных преддуговых токов.

Расчет подтверждает, что реальные сварочные шлаки могут обеспечить ток эмиссии, вполне достаточный для повторного зажигания дуги, а использование в покрытии основных электродов активных раскислителей (например, титана) и исключение их высших оксидов может служить дополнительным резервом увеличения стабилизирующих свойств покрытий с ограниченным содержанием соединений калия

5. Влияние конструкции и толщины покрытия на стабильность дуги

Конструктивно электродные покрытия отличаются толщиной, числом слоев, наличием секторов, односторонним утолщением и т. п. С точки зрения улучшения сварочно-технологических свойств электродов наибольший интерес представляет использование покрытия двухслойной конструкции.

В последние десятилетия в ряде промышленно развитых стран электроды с двухслойным покрытием получили значительное распространение. Установлено [42, 97, 228 и др.], что высокая стабильность дуги и мелкокапельный перенос могут быть достигнуты размещением CaF_2 в наружном слое, а $CaCO_3$ и ионизирующих добавок — во внутреннем. При этом одновременно достигаются две цели: первая — вынесение фторидов в периферийную зону дуги и тем самым снижение концентрации электроотрицательных элементов в приэлектродных областях и уменьшение величины нескомпенсированного отрицательного объемного заряда в переходный момент у поверхности электрода, на котором в новом полупериоде формируется катод и который препятствует выходу электронов [171]; вторая цель — увеличение концентрации электроположительных элементов (например, соединений калия), компенсирующих отрицательный объемный заряд, при общем их незначительном содержании в покрытии, что имеет важное значение для снижения токсичности сварочного аэрозоля и гигроскопичности покрытия.

Исследовалось влияние состава и соотношения площадей слоев покрытия на стабилизирующие свойства электродов. В качестве источника питания использовались трансформатор СТШ-500/80 с $U_{х.х} = 80$ В, электроды диаметром 4 мм [116]. В первой серии опытов изменяли состав покрытия постепенным вынесением CaF_2 в наружный слой покрытия путем увеличения содержания мрамора: во внутреннем, т. е. изменяли соотношение $CaCO_3/CaF_2$ в слоях. Соотношение площадей слоев оставалось при этом постоянным. Во второй серии изменяли соотношение площадей внутреннего и наружного слоев покрытия так, чтобы в нем сохранилось постоянное общее содержание мрамора и фторида кальция. В этом случае все количество CaF_2 сосредоточивалось в наружном слое и соотношением площадей слоев изменялась степень удаленности от оси дуги слоя, содержащего фторид. Содержание остальных компонентов покрытия оставалось неизменным.

Как следует из рис. 81, *а*, с увеличением количества CaF_2 в наружном слое благодаря внутреннему стабилизирующему свойству электродов существенно увеличиваются. Аналогичное благоприятное действие на стабильность дуги оказывают также удаление наружного, содержащего CaF_2 слоя к периферии при утолщении внутреннего слоя, т. е. увеличение соотношения площадей внутреннего и наружного слоев покрытия $S_п$. Однако возрастание показателя стабильности $B_э$ по мере увеличения $S_п$ наблюдается лишь до определенных пределов, после чего стабильность остается практически постоянной (рис. 81, *б*). Дальнейшее увеличение расстояния от оси до содержащего фторид слоя уже не оказывает заметного влияния на стабильность горения дуги. По-видимому, это связано с тем, что по достижении некоторой оптимальной величины соотношения площадей слоев двухслойного покрытия фторид так далеко удаляется от оси электрода, что концентрация ионов фтора или ионов фторидов в центральной высокотемпературной области дуги суще-

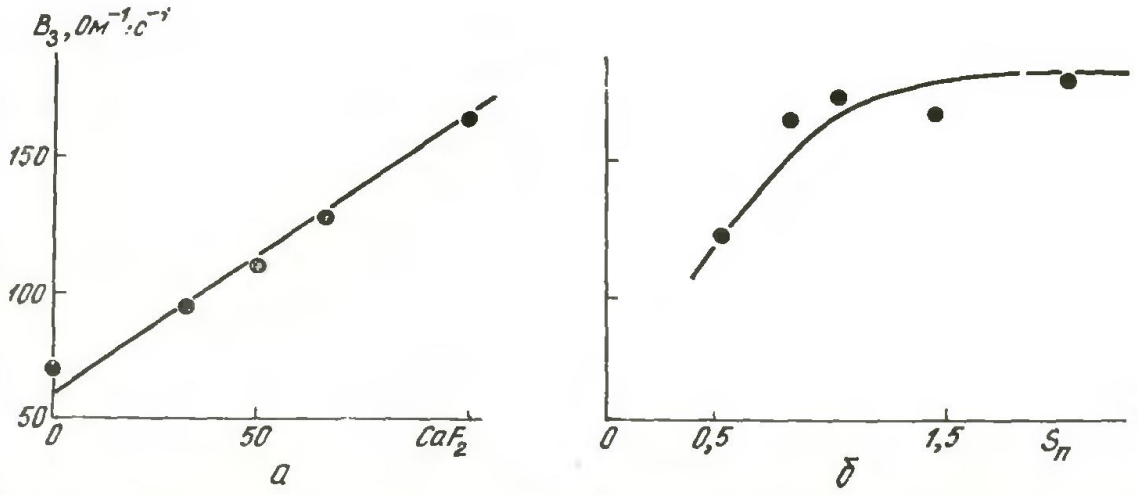


Рис. 81. Зависимость стабильности дуги от содержания CaF_2 в покрытии, %(*а*) и от соотношения площадей слоев покрытия (*б*).

ственно не изменяется и уже не влияет на стабилизирующие свойства таких покрытий.

Для электродов существенное значение имеет толщина покрытия. Увеличение коэффициента массы покрытия $K_{м.п}$ позволяет улучшить защиту наплавленного металла от окружающей атмосферы. Такие электроды менее чувствительны к удлинению дуги и эксцентричности покрытия, обладают существенно меньшими потерями металла от разбрызгивания [283]. Влияние толщины покрытия на стабильность дуги неоднозначно. Утолщение покрытия сопровождается увеличением глубины втулочки из нерасплавившегося покрытия. В свою очередь, более глубокая втулка снижает потери тепла дуги на излучение и способствует повышению температуры торца плавящегося электрода [148]. В результате в приэлектродных областях повышается внутренняя энергия, что способствует увеличению тепловой инерционности столба дуги [83]. Поэтому при погасаниях в момент смены полярности дуга должна меньше охлаждаться и быстрее восстанавливать свою первоначальную проводимость. С другой стороны, углубление втулочки приводит к удлинению дуги и увеличению напряжения зажигания.

Влияние эксцентричности покрытия при различной его толщине на стабильность дуги ранее не изучалось. В наших экспериментах [163] исследовались две серии электродов: с двухслойным и обычным покрытием при разной его толщине ($K_{м.п}$) и переменной эксцентричности.

Увеличение толщины покрытия в обычном (однослойном) электроде против ожидания приводит к некоторому снижению $U_з$ (рис. 82). В двухслойном покрытии расположение CaF_2 в наружном слое также способствует снижению $U_з$, а с размещением его во внутреннем слое $U_з$ увеличивается. В этом случае, видимо, сказывается избыток фторидов в зоне дуги и более выраженное их дестабилизирующее действие (на практике электроды с CaF_2 во внутреннем слое не применяются).

Оценивая стабильность дуги в целом (рис. 83) по показателю стабильности $B_з$, можно заметить четкую зависимость: увеличение толщины покрытия способствует увеличению стабильности дуги.

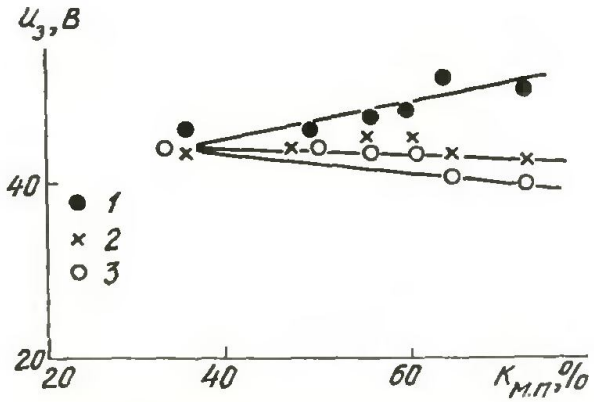


Рис. 82. Зависимость напряжения повторного зажигания (полупериоды обратной полярности) от коэффициента массы покрытия при сварке электродами с содержанием CaF_2 в покрытии: *1* — 0 %; *2* — 5 % (однослойное); *3* — 100 %.

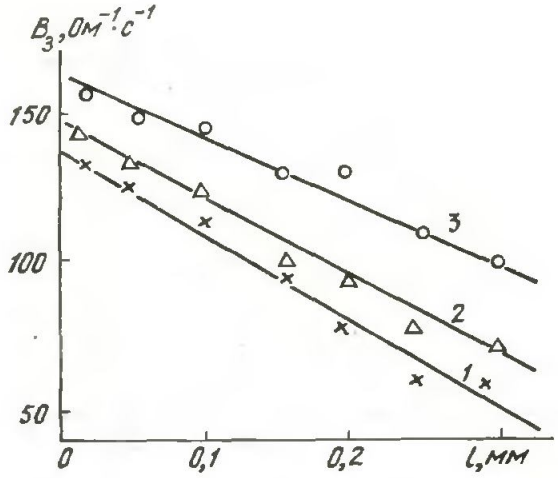


Рис. 83. Зависимость показателя стабильности дуги на эксцентриситет покрытия (электрод с однослойным покрытием):
1 — $K_{м.п} = 35$ %; *2* — 45 %; *3* — 55 %.

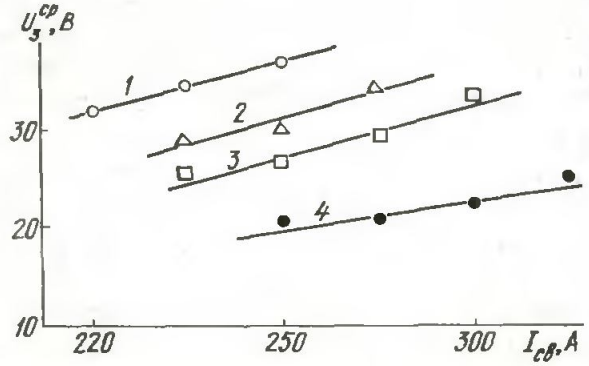


Рис. 84. Влияние содержания железного порошка в покрытии электродов, тока сварки и толщины покрытия на напряжение $U_э^{ср}$ (полупериод обратной полярности $d_э = 4$ мм);
1 — 0 %. $D/d_э = 1{,}4$; *2* — 25 %, $D/d_э = 1{,}6$; *3* — 50 %, $D/d_э = 1{,}8$; *4* — 75 %, $D/d_э = 2{,}4$.

Эксцентричность покрытия, как известно, приводит к неравномерному плавлению покрытия и образованию так называемого «козырька». Последний увеличивает длину межэлектродного промежутка со всеми вытекающими отсюда отрицательными явлениями: нарушением газовой защиты расплавленного металла, увеличением разбрызгивания [163], ухудшением стабильности дуги (см. рис. 83). Увеличение толщины ($K_{м.п}$) покрытия позволяет частично компенсировать такое действие эксцентричности. В то же время следует отметить, что во всех случаях при увеличении $K_{м.п}$ электродов выше определенного значения затрудняется процесс сварки в положениях шва, отличных от нижнего. Это связано с образованием большого количества шлака, шунтирующего дугу. Кроме того, очень толстым электродом трудно манипулировать, так как при этом затрудняется доступ к корню тавровых и стыковых швов.

Как показали исследования, оптимальными с точки зрения сохранения универсальности электрода являются значения $K_{м.п}$ 55 ± 5 %.

Таким образом, можно утверждать, что вынесение CaF_2 в наружный слой двухслойного покрытия — один из эффективных путей роста стабильности дуги переменного тока.

Повышения стабилизирующих свойств электродов основного вида можно достичь также утолщением внутреннего, не содержащего CaF_2 слоя покрытия при неизменной общей толщине двухслойного покрытия (т. е. повышением отношения площадей $S_{вн}/S_{нар}$ его слоев). Оптимальной величиной $S_п$ в этом случае является диапазон 1—1,33.

Дополнительное повышение стабильности дуги электродов (обычных и двухслойных) может быть достигнуто увеличением коэффициента $K_{м.п}$. В этом случае эффективность использования большей толщины покрытия может существенно возрасти с введением в покрытие железного порошка. На рис. 84 приведены результаты оценки свойств электродов основного вида с различным содержанием железного порошка в покрытии. Использовались электроды диаметром 5 мм, толщина покрытия электродов D выбиралась исходя из условия обеспечения одинакового коэффициента шлаковой защиты (около 30 %). Видно, что при содержании железного порошка 75 % напряжение $U_э$ снижается почти в 2 раза. Это свидетельствует о возможности существенного повышения стабильности дуги введением железного порошка в высокопроизводительных электродах.

6. Влияние типа и состава связующего на стабильность дуги

Изучалось влияние типа, состава и модуля жидкого стекла, а также его расположения в электродном покрытии

на стабильность дуги. Сварка выполнялась опытными электродами диаметром 4 мм ($K_{м.п}$ = 40 %) с покрытием на базе электродов УОНИ-13/55, изготовленных с применением литиевого, цезиевого, натриевого, калиевого и натриево-калиевого жидкого стекла. В качество источника питания использовался трансформатор СТШ-500/80 с $U_{х.х}$ = 80 В. Стабильность дуги оценивалась с помощью системы АНП-2. Показателем стабильности дуги переменного тока служила величина $U^{мин}_{х.х}$. Электроды с меньшим значением $U^{мин}_{х.х}$ обладали лучшей стабильностью дуги.

В первой серии опытов рассматривалась зависимость показателя стабильности дуги от типа жидкого стекла, во второй изучалось влияние состава жидкого стекла (отношения Na_2O/K_2O) на $U^{мин}_{х.х}$, в последней серии определялось влияние модуля натриево-калиевого ($Na_2O : K_2O$ = 70 : 30) жидкого стекла на стабилизирующие свойства покрытия. Результаты приведены на рис. 85.

Замена в покрытии литиевого жидкого стекла на натриевое и особенно на калиевое и цезиевое приводит к снижению напряжения $U^{мин}_{х.х}$ сварочного трансформатора, требуемого для обеспечения надежности повторного зажигания дуги переменного тока. В последнем случае (цезиевое жидкое стекло) по сравнению с электродами, изготовленными с использованием литиевого жидкого стекла, зна-

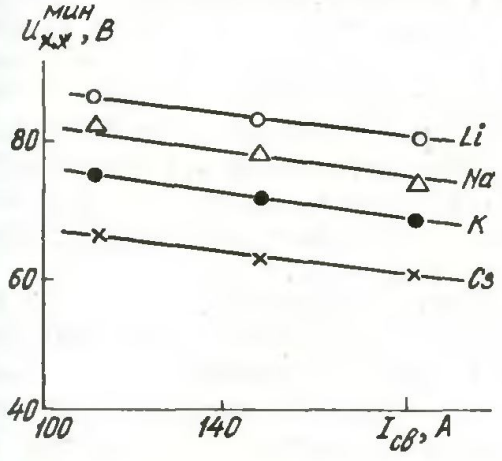


Рис. 85. Зависимость минимального напряжения холостого хода трансформатора на величину тока сварки при сварке электродами с различными связующими в покрытии.

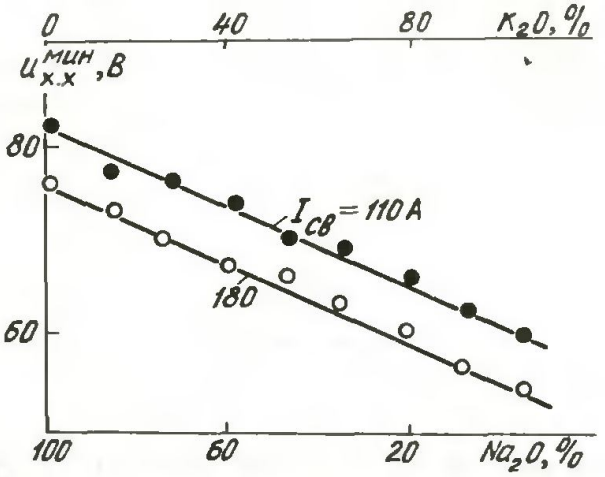


Рис. 86. Зависимость минимального напряжения холостого хода трансформатора от соотношения K_2O/Na_2O в жидком стекле.

чение $U^{мин}_{х.х}$ снижается более чем на 20 %, что дает возможность выполнять сварку электродами УОНИ-13/55 на переменном токе от стандартных трансформаторов с $U_{х.х}$ = 60...65 В. Проверка полученных расчетных значений $U^{мин}_{х.х}$ для соответствующих электродов с использованием трансформатора с изменяющимся напряжением $U_{х.х}$ показала хорошую сходимость теоретических и реальных (экспериментальных) значений $U^{мин}_{х.х}$.

Аналогичное влияние на стабильность дуги оказывает постепенное увеличение массовой доли оксидов калия в составе комбинированного жидкого стекла (рис. 86).

Изменение модуля m натриево-калиевого жидкого стекла также заметно влияет на параметры повторного зажигания и на величину $U^{мин}_{х.х}$. При этом, как показали эксперименты, снижение модуля жидкого стекла вызывает

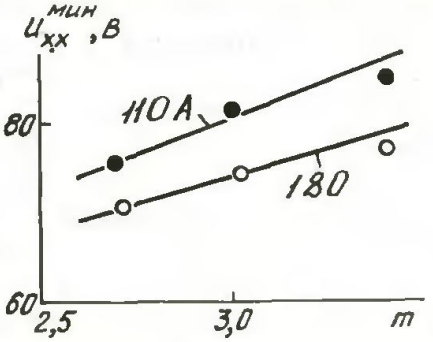


Рис. 87. Зависимость минимального напряжения холостого хода трансформатора от модуля жидкого стекла.

Таблица 20. **Зависимость показателей стабильности дуги переменного тока от соотношения K_2O и Na_2O в жидком стекле внутреннего слоя электродного покрытия***

K_2O/Na_2O	$I_{св} = 120$ А	$I_{св} = 180$ А
2,9	48/68	46/61
60,8	45/66	43/58
96,0	46/61	43/56

Примечания. 1. $U_д = 23...24$. 2. Перед чертой — значения $U_з$, В, за чертой — $U_{х.х}$, В

уменьшение $U_з$ и соответственно $U_{х.х}^{мин}$ (рис. 87).

Снижение величины $U_{х.х}^{мин}$ при замене литиевого жидкого стекла цезиевым вызвано более низким потенциалом ионизации U_i цезия по сравнению с калием, натрием и литием (значения U_i этих элементов составляют соответственно 3,87, 4,33, 5,11 и 5,40 В).

Таким образом, последовательная замена литиевого стекла в покрытии электродов основного типа натриевым, калиевым и цезиевым приводит к повышению стабильности дуги. Кроме того, улучшить стабильность горения дуги можно, повышая отношение K_2O/Na_2O в составе жидкого стекла. Уменьшение модуля жидкого стекла также способствует некоторому повышению стабилизирующих свойств покрытия при сварке на переменном токе.

Влияние состава и расположения жидкого стекла на стабильность дуги исследовалось с использованием электродов диаметром 4 мм с двухслойным покрытием, основные характеристики которых приведены в третьей главе.

Повышение доли калиевого жидкого стекла K_2O в составе связующего приводит к снижению напряжения зажигания его среднеквадратического отклонения σ и соответственно напряжение $U_{х.х}^{мин}$ (табл. 20), т. е. стабильность дуги переменного тока при этом повышается.

Можно предположить, что, как и в предыдущем случае, увеличение содержания калиевого жидкого стекла (за счет натриевого) в составе внутреннего прилегающего к стержню слоя покрытия сопровождается повышением вероятности попадания все бóльших количеств калия и его соединений в межэлектродный промежуток.

Таким образом, введение соединений более легкоионизирующихся элементов во внутренний слой в составе связующего (жидкого стекла) — один из путей улучшения сварочно-технологических свойств электродов с двухслойным покрытием (см. также работу [97]).

7. Зависимость процесса повторного зажигания дуги от состояния межэлектродного промежутка

Результаты исследований, изложенные выше, позволяют создать представление о развитии процесса повторного зажигания дуги в зависимости от состояния межэлектродного промежутка.

Известно, что одним из условий, необходимых для возникновения дуги, является достижение определенного уровня электропроводности межэлектродного промежутка [96].

Результаты, полученные в работе [71] и в настоящей монографии, показывают, что значительную роль в процессе повторного зажигания дуги играет эмиссионная способность электрода, на котором в данном полупериоде формируется катод, зависящая от его температуры и работы выхода электронов.

Установленная в наших исследованиях взаимосвязь между эмиссионными свойствами фторсодержащих шлаков и напряжением повторного зажигания дуги является не единственным механизмом влияния электроотрицательных элементов на параметры повторного зажигания. Во многих случаях работа выхода электронов из шлака меньше, чем у железа, тем не менее стабильность дуги находится на низком уровне.

Обобщая эти данные, можно сказать, что процесс повторного зажигания дуги определяется следующими факторами, характеризующими состояние межэлектродного промежутка в переходный момент, соответствующий смене полярности электродов: 1) температура электрода, сварочной ванны и газа, заполняющего межэлектродный промежуток; 2) состав

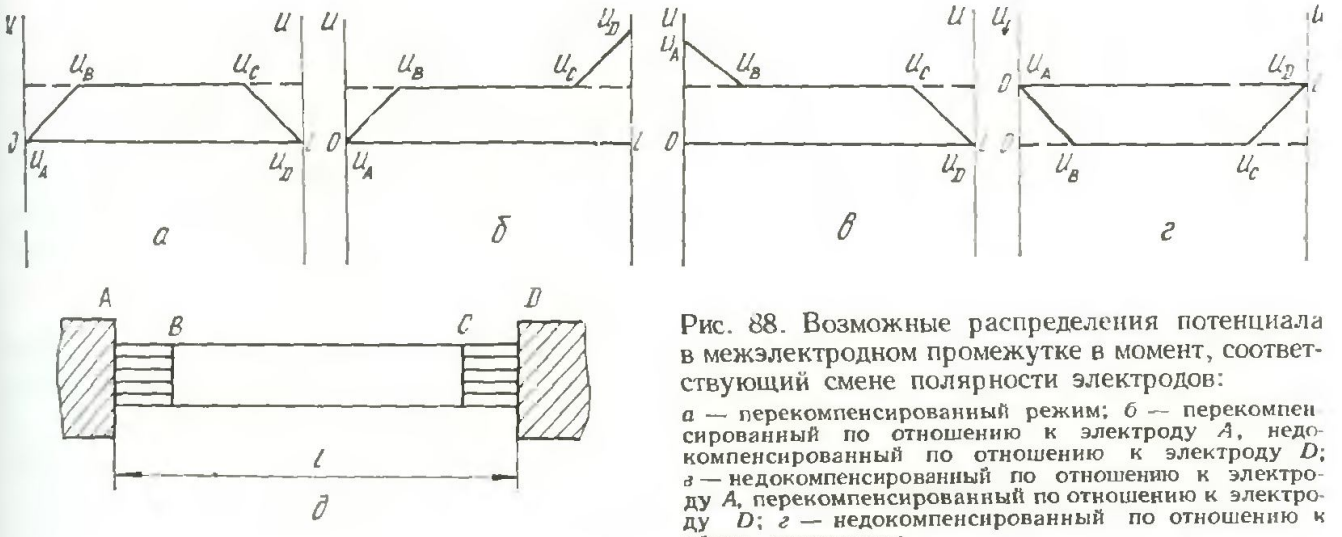


Рис. 88. Возможные распределения потенциала в межэлектродном промежутке в момент, соответствующий смене полярности электродов:

а — перекомпенсированный режим; *б* — перекомпенсированный по отношению к электроду *A*, недокомпенсированный по отношению к электроду *D*; *в* — недокомпенсированный по отношению к электроду *A*, перекомпенсированный по отношению к электроду *D*; *г* — недокомпенсированный по отношению к обоим электродам.

газовой фазы и паров в межэлектродном промежутке; 3) эмиссионные свойства электрода и сварочной ванны; 4) напряженность электрического поля, приложенного к межэлектродному промежутку.

Рассмотрим межэлектродный промежуток в переходный момент, когда внешнее электрическое поле, приложенное к промежутку от источника питания, равно нулю. При этом температура торца электрода и ванны составляет 2100—2500 К (см. параграф 2 третьей главы).

Помимо этих данных, необходимы сведения о составе атмосферы межэлектродного промежутка. Наибольшее значение здесь имеет содержание в ней щелочных и электроотрицательных элементов и форма, в которой эти элементы находятся в атмосфере промежутка. Сведения об их концентрациях и пространственных распределениях концентраций отсутствуют. Поэтому рассмотрим вначале случай, когда в покрытие электрода не входят электроотрицательные элементы и их соединения, а атомы калия равномерно распределяются в промежутке.

За основу в данном рассмотрении примем положения, разработанные в теории термоэмиссионного преобразования энергии [202], где также анализируются процессы, происходящие в низкотемпературной плазме, заключенной в пространстве между двумя нагретыми электродами.

В переходный момент на границах с плазмой, определяемой процессами релаксации, а также эмиссией, поверхностной и термической ионизацией, существуют переходные, так называемые ленгмюровские, слои. Электрические заряды, выталкиваемые из плазмы на ее границы, создают заряженные слои около электродов (электрода и ванны). При этом на границах с различными электродами результирующие знаки зарядов могут оказаться в зависимости от того, эмиттирующий электрод или нет, и если да, то какова его эмиссионная способность. На знак и значение этого заряда также влияют температура и состав газа в межэлектродном промежутке.

В зависимости от этих условий можно выделить три режима. Режим, при котором плазма находится под более низким потенциалом, чем электрод, называется недокомпенсированным. В этом случае в ленгмюровском слое возникает барьер для электронов, выходящих из электрода. Если же плазма находится под положительным потенциалом по отношению к электроду, то режим называется перекомпенсированным, при этом эмитированные электродом электроны свободно проникают в плазму. Наконец, режим, при котором потенциалы плазмы и электрода равны между собой, называется скомпенсированным. Из этого следуют возможные распределения потенциалов в системе электрод — плазма — электрод, приведенные на рис. 88. Особенно важное значение имеет знак потенциала плазмы у электрода, на котором формируется катод. Так как в дуговом разряде потенциал плазмы должен быть

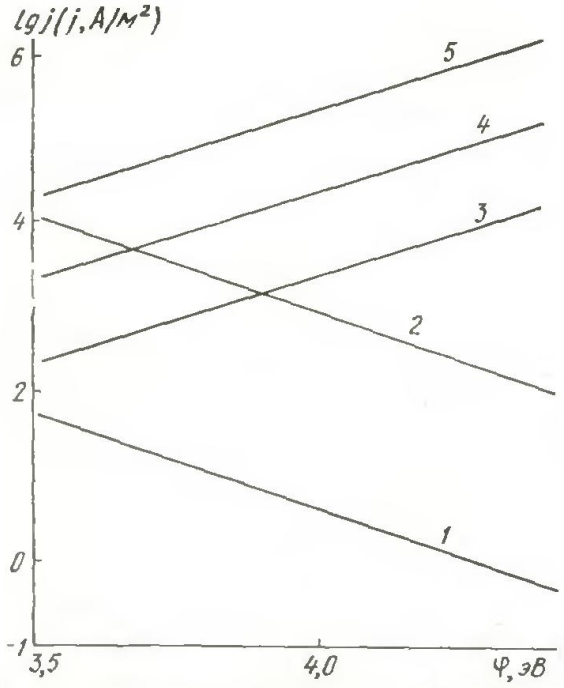


Рис. 89. Зависимость плотности термоэлектродного тока и плотности тока положительных ионов калия, образующихся в результате поверхностной ионизации, от работы выхода электрода, ($T_{эл}$ = 2100 К):

1 — плотности тока ионов калия, необходимые для выполнения условия компенсации $\beta = 1$; *2* — плотность термоэлектронного тока; *3*, *4* и *5* — плотности тока ионов калия, создающегося при содержании калия в атомосфере межэлектродного промежутка соответственно 0,01; 0,1 и 1 %.

выше потенциала катода, то обеспечение перекомпенсированного режима в переходный момент у электрода, который в предстоящем полупериоде будет катодом, является благоприятным фактором, обеспечивающим повторное зажигание дуги в положительном полупериоде. Поэтому при сделанных выше допущениях необходимо проанализировать процессы, происходящие в ленгмюровском слое в переходный момент дуги.

Прежде всего необходимо выяснить, не будут ли электроны, эмитируемые в переходный момент электродом (сварочной ванной), создавать объемный отрицательный заряд у его поверхности, который будет препятствовать выходу электронов и тем самым ограничивать вклад электрода в процесс развития разряда.

В первой главе показано, что при использовании легкоионизируемых элементов в составе сварочных материалов и отсутствии отрицательных ионов в межэлектродном промежутке компенсация объемного отрицательного заряда обеспечивается без труда, так как даже одних положительных ионов, эмитируемых шлаками, достаточно для выполнения такой функции.

При наличии атомов легкоионизируемых элементов в атмосфере, заполняющей межэлектродный промежуток, процесс компенсации тем более будет значителен.

Как показано в первой главе, для атомов калия эффективен механизм поверхностной ионизации. Рассмотрим вклад положительных ионов калия, образующихся вследствие действия этого механизма, в процессе компенсации объемного заряда, создаваемого термоэлектронами.

На рис. 89 даны зависимости плотности термоэлектронного тока от работы выхода электронов и плотности тока ионов, необходимые при этих условиях для обеспечения режима компенсации в приэлектродном слое. Здесь же показаны плотности тока ионов калия, образующихся вследствие поверхностной ионизации (см. рис. 31). Как отмечено в первой главе, количество ионов, образующихся из-за поверхностной ионизации, определяется в основном концентрацией атомов данного элемента, температурой электрода, работой выхода электронов из него и слабо зависит от температуры газа, заполняющего межэлектродный промежуток.

В тех случаях, когда состояние плазмы определяется концентрацией атомов легкоионизирующегося элемента в межэлектродном промежутке и характеристиками электрода, изменение потенциала в ленгмюровском слое определяется простым выражением [202].

$$\Delta U = \frac{T_e}{2e} \ln \beta, \qquad (2.21)$$

где T_e — температура электрона, эВ;

$$\beta = \frac{j_{i+}}{j_e} \sqrt{M_{i+}/m_e}; \qquad (2.22)$$

j_{i+} — плотность тока положительных ионов; j_e — плотность тока электронов; M_{i+} — масса положительного иона; m_e — масса электрона.

Такому случаю соответствует состояние межэлектродного промежутка в переходный момент дуги при наличии в нем щелочных элементов. В общем же случае, когда поступление ионов и электронов определяется совокупностью различных механизмов, выражение для ΔU имеет более сложный вид, но понятие параметра компенсации β носит универсальный характер (202). Условие $\beta > 1$ соответствует перекомпенсированному режиму ($\Delta U > 0$), $\beta = 1$ — скомпенсированному ($\Delta U = 0$), $\beta < 1$ — недокомпенсированному ($\Delta U < 0$) режиму.

Вследствие превышения плотности тока положительных ионов над плотностью тока, необходимой для компенсации объемного заряда, создаваемого электронами (см. рис. 89), на границе плазмы с электродом создается скачок потенциала, зависимость которого от работы выхода электронов и температуры электрода показана на рис. 90. Здесь принято, что в атмосфере межэлектродного промежутка концентрация атомов калия составляет 1 %. Таким образом, при указанных допущениях относительно содержания атомов калия и отсутствия электроотрицательных атомов и молекул в межэлектродном промежутке одной лишь термоионной эмиссии из шлака (см. параграф 4 первой главы), не говоря уже о поверхностной ионизации калия, достаточно для того, чтобы объемный отрицательный заряд, создаваемый термоэлектронами у поверхности электрода в переходный момент,

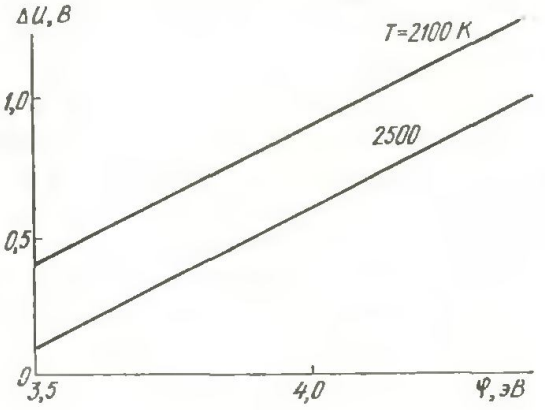


Рис. 90. Зависимость приэлектродного скачка потенциала в переходный момент дуги от работы выхода электронов и температуры электрода. Содержание калия в межэлектродном промежутке 1 %.

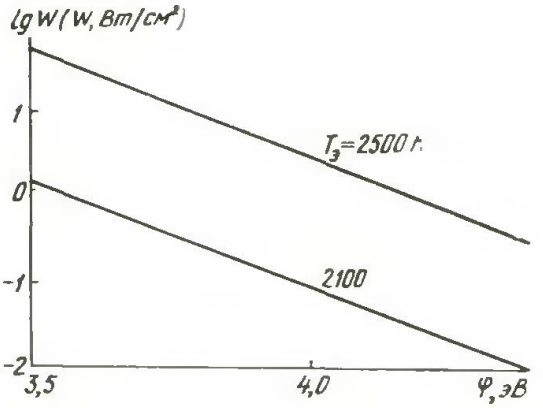


Рис. 91. Зависимость удельной мощности, вносимой в газ термоэлектронами, от работы выхода электронов и температуры электрода.

был скомпенсирован и не препятствовал отбору электронов в широком диапазоне значений их работы выхода и температуры электрода.

Оценим количество энергии, вносимой термоэлектронами в межэлектродное пространство в переходный момент.

Поток кинетической энергии частиц, имеющих распределение Максвелла, равен произведению удвоенной температуры на поток частиц. К этой величине необходимо прибавить энергию, набираемую электронами при прохождении приэлектродного скачка потенциала ΔU

$$W = \frac{j_e}{e}(2T_э + \Delta Ue). \qquad (2.23)$$

Результаты подстановки численных значений с учетом данных рис. 90, показаны на рис. 91. Видно, что, хотя скачок потенциала в приэлектродном слое снижается с уменьшением работы выхода электронов, количество энергии, вносимой термоэлектронами, возрастает из-за увеличения плотности тока.

По мере увеличения количества положительных ионов, поступающих к электроду из межэлектродного промежутка, в результате развития там ионизационных процессов будет возрастать скачок потенциала ΔU, а соответственно и энергия, вносимая термоэлектронами в межэлектродный промежуток.

Рассмотренный выше скачок потенциала в приэлектродном слое образован положительными ионами, появляющимися вследствие поверхностной ионизации ка-

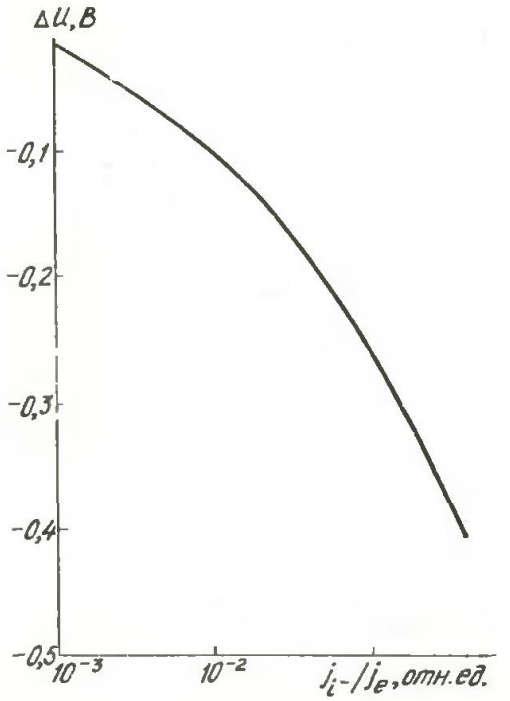


Рис. 92. Зависимость величины и знака скачка потенциала, препятствующего выходу электронов из электрода, от отношения плотности отрицательных ионов фтора к плотности тока электронов (исходное состояние при $\Delta U = 0$ соответствует скомпенсированному режиму $\beta = 1$).

калия, и термоэлектронами в отсутствие электроотрицательных элементов. Отрицательно заряженные частицы, таким образом, представлены только электронами.

Как уже отмечалось, обеспечение перекомпенсированного или хотя бы скомпенсированного режима у поверхности электрода, который в предстоящем полупериоде должен стать катодом, является благоприятным фактором, облегчающим повторное зажигание дуги, поскольку здесь особенно необходимо создать условия для беспрепятственного прохождения электронов. В случае недокомпенсированного режима $\Delta U < 0$, поэтому уменьшается не только плотность термоэлектронного тока, но, как видно из уравнения (2.28), и количество энергии, вносимой каждым электроном в межэлектродный промежуток.

Проанализируем характер изменения режима компенсации при образовании отрицательных ионов в приэлектродных областях. Анализ выражений для ΔU и β показывает, что появление отрицательных ионов в приэлектродной области должно резко сказываться на параметре компенсации и, следовательно, на величине ΔU. Это связано с тем, что скомпенсировать объемный отрицательный заряд, создаваемый ионами, намного труднее, поскольку подвижности положительных и отрицательных ионов имеют один порядок в отличие от электронов. Например, для компенсации ($\beta = 1$) объемного заряда ионов фтора положительными ионами калия необходимо выполнить условие

$$\frac{j_{K+}}{j_{F-}} \sqrt{M_{K+}/M_{F-}} = 1, \qquad (2.24)$$

где M_{K+} и M_{F-} — массы ионов соответственно калия и фтора.

После подстановки численных значений получим $j_{F-} = 1{,}43\, j_{K+}$. Для компенсации же объемного заряда электронов условие (2.22) будет выполняться при соотношении $j_e = 270 j_{K+}$.

Таким образом, чтобы скомпенсировать объемный заряд, создаваемый током ионов фтора плотностью, равной плотности тока электронов, необходима плотность тока ионов калия, приблизительно в 190 раз большая, чем в случае электронов.

Еще более сильно должно сказываться образование молекулярных отрицательных ионов. Так, для компенсации объемного заряда, создаваемого ионами SiF_3^-, понадобилась бы плотность тока ионов калия, почти в 300 раз большая, чем для компенсации объемного отрицательного заряда, создаваемого электронным током такой же плотности, что и плотность тока ионов SiF_3^-. Из этого следует, что если у поверхности электрода, который в предстоящем полупериоде будет служить катодом, образуются отрицательные ионы хотя бы в незначительном количестве по сравнению с количеством электронов, то необходимо рассматривать условие компенсации не объемного отрицательного заряда электронов, а объемного заряда, создаваемого совместным действием электронов и отрицательных ионов, имеющих разные массы, а следовательно, и сильно отличающиеся подвижности.

Пусть j_{e_0} — начальная плотность тока электронов, j_{i_+} — плотность тока поло-

жительных ионов, необходимая для компенсации объемного заряда электронов, f — часть электронов, образовавших отрицательные ионы, $1 - f$ — оставшаяся часть плотности электронного тока. Тогда

$$\beta = j_{i_0^+} \sqrt{M_{i^+}}/j_{e_0} [f \sqrt{M_{i^-}} + (1 - f) \sqrt{M_e}]. \quad (2.25)$$

Для частного случая компенсации отрицательного объемного заряда ионами калия после подстановки численных значений получим

$$\beta = 1/1 + 42{,}8 \sqrt{M_{i^-} f}. \quad (2.26)$$

Подставив значения f, можно пронаблюдать характер изменения для данного сорта отрицательных ионов (см. рис. 92).

Для коэффициента K, показывающего, во сколько раз нужно увеличить плотность тока положительных ионов калия по сравнению с начальной величиной для устранения декомпенсации отрицательного объемного заряда, вызванной появлением ионов фтора, из выражения (2.26) после подстановки M_{F^-} и с учетом того, что $\Delta U \sim \ln \beta$, получаем

$$\beta = K/1 + 1{,}86 \cdot 10^2 f = 1;$$
$$K = 1 + 1{,}86 \cdot 10^2 f, \quad (2.27)$$

т. е. уже при плотности тока ионов фтора, в 100 раз меньшей плотности электронного тока, необходимо увеличить количество положительных ионов калия в 2,86 раза, чтобы вернуться к прежнему режиму компенсации, существовавшему в отсутствие отрицательных ионов (рис. 93). Аналогично можно найти значения K для других элементов и соединений.

Если вблизи имеется объемный отрицательный заряд, то характер изменения плотности тока, проходящего через межэлектродный промежуток в преддуговой период времени, определяется «законом трех вторых», согласно которому (97)

$$j_p = AU^{3/2}/d^2, \quad (2.28)$$

где A — коэффициент пропорциональности; U — напряжение межэлектродного промежутка, d — его протяженность. Для мощности, вводимой преддуговым током в единичный объем межэлектродного пространства, в таком случае можно записать

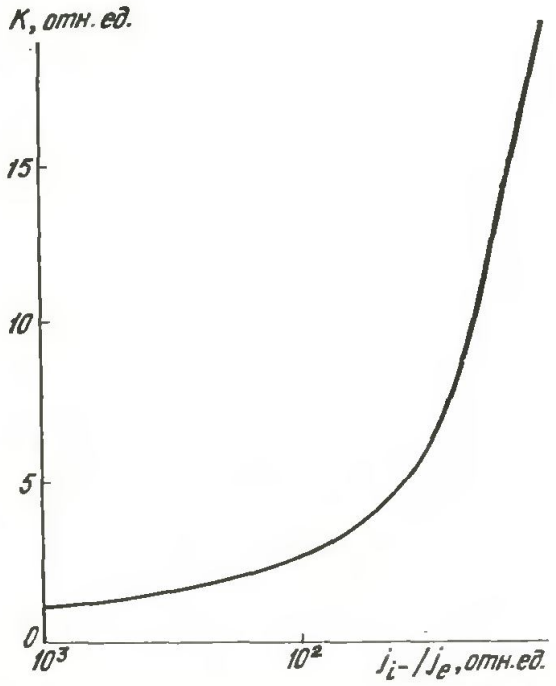


Рис. 93. Зависимость коэффициента K от отношения плотности тока отрицательных ионов фтора к плотности тока электронов в приэлектродной области.

$$Q' = jE = AU^{5/2}/d^3. \quad (2.29)$$

При наличии у поверхности катода отрицательного заряда значение j_r, определяемое выражением (2.28), будет меньше плотности тока j_e, определяемого эмиссионной способностью катода.

Величина Q' в уравнении (2.29) представляет собой мощность, вводимую в объем межэлектродного пространства в режиме ограничения тока эмиссии объемным зарядом. При отсутствии ограничения, обусловленного объемным отрицательным зарядом, мощность, вводимая в единичный объем межэлектродного пространства, определяется выражением

$$Q'' = j_e U/d. \quad (2.30)$$

Повторное зажигание дуги происходит при достижении напряжением значения $U_з$.

Для соответствующих этим моментам времени значений Q' и Q'' можно записать

$$Q'_з = A (U'_з)^{5/2}/d^3 = j_p U'_з/d; \quad (2.31)$$

$$Q''_з = j_e U''_з/d. \quad (2.32)$$

Для полупериода каждой полярности при данном составе электродного покры-

тия мощность зажигания дуги постоянна [97], т. е. $Q_з' \approx Q_з''$. Поэтому отношение значений напряжений зажигания $U_з'$ и $U_з''$ имеет вид

$$U_з''/U_з' = j_p/j_e. \qquad (2.33)$$

При ограничении тока объемным зарядом $j_p < j_e$, а следовательно, $U_з'' > U_з'$. В свою очередь, при наличии количества положительных ионов, достаточного для компенсации объемного отрицательного заряда, отношение $U_з''/U_з'$ уменьшается по мере увеличения j_e (уменьшения φ).

Степень влияния объемного заряда, создаваемого у поверхности катода отрицательными ионами, определяется при данной плотности тока положительных ионов отношением j_i/j_e (см. рис. 93). По мере развития в межэлектродном пространстве ионизационного процесса увеличивается отбор эмиссионного тока с катода. Приняв, что $j_{i-} = 1 \cdot 10^4$ А/м^2 (см. параграф 7 первой главы) можно пронаблюдать характер изменения степени влияния отрицательных ионов по мере роста преддугового тока в межэлектродном промежутке (см. рис. 93). Из рис. 92 и 93 видно, что влияние тока в прикатодном слое устраняется при значениях разрядного тока 5—10 А (для диаметра электродов 4 мм), близких к регистрируемым на практике значениям.

Напряжение, которое должно быть приложено от источника питания для того, чтобы от недокомпенсированного режима ($\Delta U < 0$) перейти к скомпенсированному ($\Delta U = 0$), можно оценить из следующих соображений. Если l — длина межэлектродного промежутка, a — протяженность ленгмюровского слоя, а U — напряжение, прикладываемое к нему от источника питания, то необходимое значение напряжения определяется выражением

$$U = \frac{l}{a} \Delta U. \qquad (2.34)$$

В случае $\Delta U \geqslant 0$ напряжение, прикладываемое от источника питания, должно быть достаточным для того, чтобы посредством ускорения электронов обеспечивать необходимый для зажигания дуги нагрев газа в межэлектродном промежутке. Если же $\Delta U < 0$ (недокомпенсированный режим), то это напряжение должно удовлетворять еще одному требованию: оно должно превышать значение, определяемое выражением (2.34). По-видимому, в этом кроется причина появления больших пиков зажигания при наличии в дуге электроотрицательных элементов.

Сильно выраженной зависимостью процесса повторного зажигания дуги от массы и концентрации отрицательных ионов у поверхности электрода, на котором формируется катод в новом полупериоде, по-видимому, можно объяснить тот экспериментальный факт, что при сварке электродами, основу покрытий которых составляют системы CaF_2 — TiO_2 или CaF_2 — SiO_2, стабильность дуги переменного тока снижается особенно резко при содержании CaF_2 до 10 %, а затем во всем диапазоне его увеличения, вплоть до 100 %, изменяется мало (см. параграф 2 настоящей главы).

Таким образом, главным механизмом дестабилизирующего действия электроотрицательных элементов на повторное зажигание дуги является создание в переходный момент у поверхности электрода, на котором в новом полупериоде формируется катод нескомпенсированного отрицательного объемного заряда, препятствующего выходу электронов. Для его компенсации, предшествующей повторному зажиганию дуги, приходится увеличивать содержание легкоионизируемых элементов или повышать напряжение источника питания по сравнению с тем случаем, когда в атмосфере дуги не содержатся электроотрицательные атомы и молекулы.

Глава третья

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАГРЕВЕ ЭЛЕКТРОДОВ

1. Распространение тепла

Тепловое состояние металла, шлака и других компонентов, взаимодействующих в процессе образования сварного соединения, в значительной мере обусловливает характер, направление и скорость протекания всех физико-химических и металлургических процессов.

С тепловыми процессами непосредственно связаны такие важнейшие характеристики дуговой сварки, как скорость нагрева металла, скорость расплавления, производительность и др., поэтому исследование тепловых процессов при дуговой сварке плавлением имеет большое значение для изыскания путей увеличения эффективности сварочных процессов.

Тепловые процессы, происходящие при сварке покрытыми электродами, изучали Н. Н. Рыкалин, А. Г. Мазель, Г. И. Лесков, А. А. Ерохин, Г. Х. Вашинк и другие советские и зарубежные ученые [183, 104, 97, 50, 316].

Тепловая энергия, затрачиваемая на плавление электрода, в основном обеспечивается процессами, происходящими в дуге, а также выделением тепла при прохождении тока через электродный стержень.

Мощность, выделяющаяся в дуговом разряде, передается окружающим его телам излучением, теплопроводностью и конвективными потоками газа,

$$P_д = I_{св} U_д. \qquad (3.1)$$

Поскольку общее напряжение дуги

$$U_д = U_к + U_{ст} + U_а, \qquad (3.2)$$

где $U_к$, $U_а$ и $U_{ст}$ — падения напряжения в катодной и анодной области и столбе дуги, то

$$P_д = I_{св} U_к + I_{св} U_{ст} + I_{св} U_а. \qquad (3.3)$$

Каждое из слагаемых этого уравнения определяет электрическую мощность, выделяющуюся в одной из частей дуги.

Столб дуги теряет энергию в основном лучеиспусканием, потери тепла теплопроводностью при этом невелики [97, 50].

В практике сварки используется лишь та часть мощности дуги, которая передается электродам и используется для их нагрева и плавления. В основном это энергия, выделяемая в приэлектродных областях и передаваемая активным пятнам дуги, главным образом теплопроводностью [97, 50]. Роль излучения столба дуги в нагреве электродов мала [104, 97, 50].

Передача теплоты от дуги к электродной капле и стержню. Часть энергии, выделяемой дугой у расплавленного торца электрода, теряется на излучение и испарение металла. Оставшаяся ее часть поглощается жидким металлом капли. Последний, в свою очередь, передает тепловую энергию твердому металлу, вызывая нагрев и последующее расплавление электродного стержня.

Уравнение баланса энергии для расплавляемого торца электрода от мощности дуги без учета некоторых малозначительных составляющих (опущенных для упрощения рассматриваемой модели тепловых процессов, о которых будет сказано ниже) выглядит следующим обра-

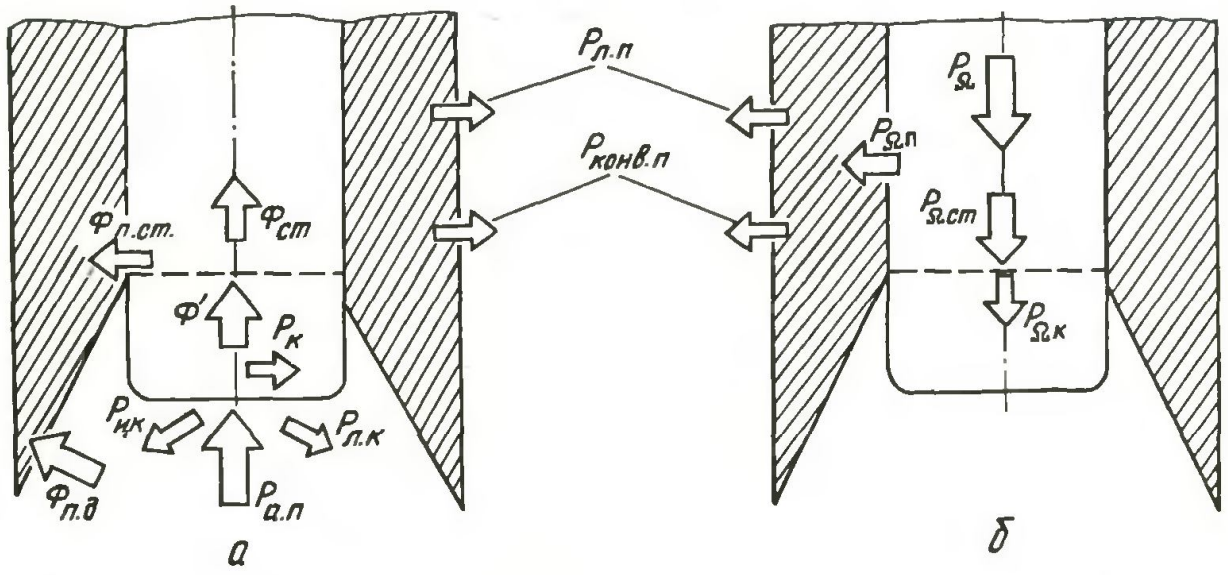


Рис. 94. Схема распределения тепловых потоков, вызванных энергией, выделяемой в активном пятне электрода и столбе дуги (*а*), нагревом электродного стержня при прохождении через него сварочного тока (*б*):

$P_{а.п}$ — мощность, выделяемая дугой в активном пятне на электроде: $P_{и.к}$ — мощность, затрачиваемая на испарение металла капли; $P_{л.к}$ — потери мощности на излучение с поверхности капли; $\Phi_{п.д}$ — мощность, воспринимаемая покрытием непосредственно от плазмы дуги: $P_к$ — мощность, поглощаемая металлом электродной капли, Φ' — тепловой поток, вводимый в стержень от дуги через каплю; $\Phi_{п.ст}$ — то же, передаваемый покрытию в областях, прилегающих к расплавленному металлу капли; $\Phi_{ст}$ — тепловой поток, передаваемый электродному стержню, P_Ω — тепловая мощность, вводимая в стержень в результате прохождения сварочного тока, $P_{\Omega п}$ — то же, *поглощаемая покрытием*; $P_{\Omega ст}$ — часть тепловой мощности, идущая на нагрев стержня; $P_{\Omega к}$ — тепловая мощность, передаваемая электродной капле.

зом (рис. 94, *а*):

$$P_{а.п} = P_к + \Phi' + P_{и.к} + P_{л.к}, \qquad (3.4)$$

где $P_{а.п}$ — мощность, генерируемая в активном пятне электрода за единицу времени; $P_к$ — мощность, поглощаемая жидким металлом капли; Φ' — тепловой поток, передаваемый твердому металлу электродного стержня и покрытию через каплю; $P_{л.к}$ и $P_{и.к}$ — тепловые потоки, характеризующие потери энергии на излучение и испарение с поверхности капли.

Мощность, получаемая электродом от дуги

$$P_{а.п} = I_{св} U_0, \qquad (3.5)$$

где U_0 — постоянная, которая обычно зависит от полярности тока, состава металла на поверхности торца электрода и свойств плазмы сварочной дуги. По данным [261], для анода $U_0 \approx 5{,}5$ В. В работе [317] приводится значение $U_0 = (6 \pm 0{,}5)$ В.

Г. И. Лесков [97] для мощностей, передаваемых аноду и катоду, приводит уравнения

$$P_а = I_{св} (U_а + U_{в.а}); \qquad (3.6)$$

$$P_к = f I_{св} (U_к + U_i) + (1 - f) I_{св} U_к \varepsilon_e - I_{св} U_{в.к}, \qquad (3.7)$$

где $U_{в.а}$ — работа выхода электронов с анода, $U_{в.а} = \varphi_а / e$; f — доля ионного тока; $U_{в.к} = \varphi_к / e$ — работа выхода электронов с катода; ε_e — доля кинетической энергии, передаваемой электронами в катодной области.

Значения $P_а$ и $P_к$ можно определить также из выражений [50]

$$P_а = U_а I_{ср} + \left(\varphi_а + \frac{3}{2} K T_e\right) I_{св}; \qquad (3.8)$$

$$P_к = f (U_к + U_i - \varphi_к) I_{св}, \qquad (3.9)$$

где $\varphi_а$ и $\varphi_к$ — эффективная работа выхода электронов с анода и катода; T_e — температура электронов.

По вопросу испарения металла в дуге в литературе представлено немного данных, а те, что имеются, существенно различаются.

Тепловая мощность, затрачиваемая на испарение металла капли, имеет вид

$$P_{и.к} = \alpha_и (t) P_{а.п}, \qquad (3.10)$$

где $\alpha_и (t)$ — удельная скорость испарения. Коэффициент зависит от плотности

тока в пятне дуги, теплофизических свойств материала электрода и др. Д. Хоуден приводит для железа значение $\alpha_п = 0{,}0016$ мг/(А · с) (при $I_{св} = 300$ А) [257].

Среднюю мощность, затрачиваемую на испарение металла капли, можно вычислить также по уравнению [97]

$$P_{и.к} \approx 0{,}1 k_п \frac{W_к - g_к}{\mu} I_{св}, \qquad (3.11)$$

где $k_п$ — коэффициент плавления электрода; $W_к$ — энергия связи кристаллической решетки; $g_к$ — теплосодержание жидкого металла при температуре кипения; μ — атомная масса материала электрода. Величина $W_к$ определяется по уравнению [98]

$$W_к = W_s + W_i, \qquad (3.12)$$

где W_s — энергия сублимации, $W_s = 9{,}4 \cdot 10^4 T_{исп}$; $T_{исп}$ — температура испарения металла капли; W_i — энергия ионизации, $W_i = 9{,}65 \cdot 10^7 U_i$. Потери мощности на излучение с поверхности капли

$$P_{л.к} = \sigma \varepsilon F_л (T_к^4 - T_с^4). \qquad (3.13)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2 · К^4); ε — коэффициент черноты; $F_л$ — поверхность излучения; $T_к$ и $T_с$ — температура жидкого металла капли на электроде и окружающей среды, воспринимающей излучение. В то же время капля воспринимает некоторое количество лучистой энергии (мощности) от столба дуги и ванны $P'_л$ и отдает некоторую мощность $P'_{конв}$ путем конвекции обтекающему ее газовому потоку (на рис. 94, *а* мощности $P'_л$ и $P'_{конв}$ не показаны). Кроме того, вследствие химических реакций, происходящих в капле на торце электрода, а также в электродном покрытии при его нагреве в процессе сварки, генерируется (или теряется) мощность $P_{хим}$, которую можно рассчитать по уравнению, отражающему тепловой эффект реакции и расход реагентов. Величины $\Delta P = P_{л.к} + P'_л - P'_{конв}$ и $P_{хим}$, как показывают оценочные расчеты, невелики (не более 3—4 % от общей мощности $P_{а.п}$) [49, 50] и для упрощения схемы распространения тепла их в дальнейшем не будем принимать во внимание. Тепловую мощность, характеризующую тепловую энергию, поглощаемую жидким металлом электродной капли, можно вычислить по выражению

$$P_к = v_{ст} c_p (T_к^{ср} - T_{пл}), \qquad (3.14)$$

где $\mu_{ст}(t)$ — масса стержня, расплавляемая за единицу времени; $T_к^{ср}$ — средняя температура капли; $T_{пл}$ — температура плавления металла капли. В выражении (3.14) величина $T_к^{ср}$ учитывает нагрев капли вследствие выделения тепловой мощности в активном пятне и от прохождения электрического тока через расплавленный металл.

Тепловой поток Φ' (см. рис. 94) расходуется на увеличение температуры металла капли от начальной $T_{нач}$ до температуры плавления $T_{пл}$, его расплавление и на тепловую составляющую $\Phi_{п.ст}$, передаваемую электродному покрытию в областях, непосредственно прилегающих к расплавленному металлу капли,

$$\Phi'(t) = \Phi_{ст}(t) + \Phi_{п.ст}(t). \qquad (3.15)$$

Здесь $\Phi_{ст}(t)$ — тепловой поток, вводимый в электродный стержень, который можно определить по формуле [316]

$$\Phi_{ст}(t) = v_{ст} \{H_{пл} - H[T_{ст}(t)]\}, \qquad (3.16)$$

где $H_{пл}$ — энергия, необходимая для превращения 1 кг стали, находящейся при температуре $T = T_о$ в 1 кг расплавленного металла ($T = T_{пл}$); H — теплосодержание металла. Для чистого железа $T_{пл} = 1536$ °С и $H_{пл} = 1{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг [233]. При этом масса стержня, расплавляемого за единицу времени,

$$v_{ст} = -\rho_{ст} S_{ст} dl_э/dt. \qquad (3.17)$$

Учитывая, что длина электрода $l_э$ в процессе сварки изменяется дискретно, при рассмотрении нагрева и плавления стержня необходимо принимать во внимание средний тепловой поток, $\overline{\Phi}'_{ст}$, вводимый в стержень в интервале времени от t_1 до t_2.

Средний тепловой поток, идущий непосредственно на нагрев и плавление

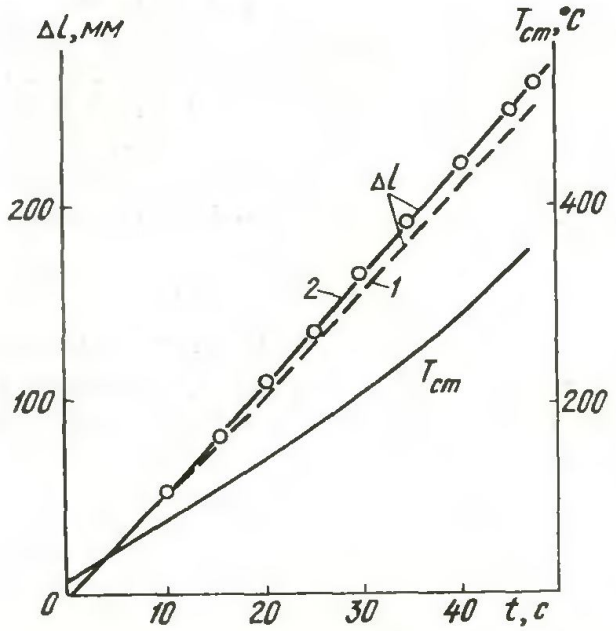


Рис. 95. Типичная зависимость расплавляемой длины электрода (*1* — расчетная, *2* — экспериментальная) и температуры центральной части стержня от времени сварки электродами с основным покрытием ($d_э$ = 3,25 мм, $I_{св}$ = 133 А; постоянный ток обратной полярности) [316].

стержня, имеет вид [316]

$$\bar{\Phi}'_{ст}(t_1, t_2) = \\ = -\rho_{ст} S_{ст} \{l_э(t_2) - l_э(t_1)\} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{H_{пл} - H(t)}, \quad (3.18)$$

где $\rho_{ст}$ — плотность металла электродного стержня; $S_{ст}$ — площадь поперечного сечения стержня. При этом $\bar{\Phi}'_{ст}$ будет меняться с изменением времени t_1 если $\Phi_{ст}$ переменно, $\bar{\Phi}'_{ст} = \Phi'_{ст}$ при постоянном значении $\Phi'_{ст}$.

На рис. 95 показана типичная зависимость температуры центральной части стержня и расплавляемой длины электрода от времени сварки, полученная в работе [316] без учета нагрева стержня проходящим током (т. е. при допущении $T_{ст} = T_0 = \text{const}$). Здесь же представлены экспериментальные величины $\Delta l_э$. Тангенс угла наклона кривой $\Delta l_э = f(t_{св})$, пропорциональный $\bar{\Phi}'_{ст}$ (см. формулы (3.17) и (3.18)), постоянен, следовательно, он не зависит от времени для данного электрода. С другой стороны, наклон аналогичной кривой, полученной в результате эксперимента, с течением времени изменяется (величина $dl_э/dt$ растет), что вызвано воздействием джоулева тепла, выделяющегося вследствие прохождения тока по электродному стержню. Поскольку тангенс угла наклона рассматриваемой кривой пропорционален скорости плавления, то из данных рис. 95 следует, что скорость плавления электрода при увеличении времени сварки повышается. Поэтому при подсчете общей тепловой энергии, сообщаемой электроду, составляющую мощности теплового потока, вызванного выделением джоулева тепла, следует учитывать.

Для определения мощности теплового потока можно использовать также формулу [183]

$$\Phi_{ст} = v_{пл}(t) S_{ст} \rho_{ст} (H_к - H_{ст}), \quad (3.19)$$

где $H_к$ — теплосодержание металла отрывающихся капель; $H_{ст}$ — теплосодержание металла стержня от нагрева проходящим током,

$$H_{ст}(t) = \int_{T_0}^{T} c_{ст}(T')\, dT' \quad (3.20)$$

где $c_{ст}$ — средняя удельная теплоемкость металла стержня в интервале температур $T_0 - T$; T_0 и T — начальная (293 К) и конечная температура нагрева стержня.

Передача тепла электродному покрытию. Нагрев и плавление покрытия происходит вследствие передачи ему тепла, выделяющегося в дуге и в электродном стержне. Тепловой мощностью, передаваемой покрытию непосредственно от расплавленного металла электродной капли, по мнению авторов работы [316], можно пренебречь, поэтому с целью упрощения при рассмотрении тепловых процессов при ручной дуговой сварке мы учитывать его не будем.

На внешней стороне покрытия тепловой поток, возникающий от нагрева покрытия, уносится в окружающую среду излучением и естественной конвекцией.

Тепловую мощность, поглощаемую покрытием, можно определить из выражения

$$\Phi_п = \Phi_{п.д} + \Phi_{п.ст}, \quad (3.21)$$

где $\Phi_{п.д.}$ — мощность, воспринимаемая покрытием непосредственно от плазмы дуги; $\Phi_{п.ст}$ — тепловой поток, вводимый в покрытие от электродного стержня. В свою очередь, тепловой поток, поступающий в электродное покрытие от стержня, складывается из тепловой мощности $\Phi_{п.к}$, передаваемой в стержень от активного пятна дуги через электродную каплю, и мощности $P_{\Omega п}$, выделяемой в результате прохождения тока по электродному стержню:

$$\Phi_{п.ст} = \Phi_{п.к} + P_{\Omega п}. \qquad (3.22)$$

При этом джоулевым теплом, выделяющимся в результате прохождения тока по электродному покрытию, можно пренебречь, так как его омическое сопротивление на несколько порядков выше, чем сопротивление железа [258]. Поэтому электрический ток в покрытии можно не учитывать.

В соответствии с принятой схемой сварки и распространения тепла можно заключить, что основная часть тепловой энергии, необходимой для нагрева и расплавления покрытия, обеспечивается, главным образом, дугой.

Тепловую мощность, вводимую в покрытие вследствие процессов, происходящих в сварочной дуге, можно оценить по выражению

$$\Phi_{п.д} = A_1 I_{св} E h_{вт}, \qquad (3.23)$$

где A_1 — коэффициент пропорциональности; $h_{вт}$ — длина (высота) втулочки из покрытия.

Длина втулочки, образующейся из неоплавившегося покрытия на торце электрода в большинстве случаев (например, при ручной дуговой сварке короткой дугой (опиранием), определяет длину дугового промежутка. Она пропорциональна толщине и условной температуре плавления покрытия и обратно пропорциональна его теплопроводности,

$$h_{вт} = K' K_{м.п} v_{ст}, \qquad (3.24)$$

где K' — коэффициент пропорциональности, учитывающий условную температуру плавления покрытия и его теплопроводность; $K_{м.п}$ — коэффициент массы покрытия.

Длина втулочки из покрытия, поглощающей энергию от дуговой плазмы, составляет обычно несколько миллиметров, аксиальную напряженность электрического поля можно принять $E \approx 1$ В/мм [316]. Тогда мощность, поглощаемая единицей массы покрытия, составит, по приближенным оценкам [316], порядка 10^6 Дж/кг.

А. А. Ерохин предлагает для расчета тепловой мощности дуги, расходуемой на плавление электродного покрытия, следующую зависимость [49]:

$$\Phi_{п.д} = K_{м.п} v_{ст} x, \qquad (3.25)$$

где x — затраты тепла на нагрев и плавление покрытия (шлака) в дуговом промежутке.

Тепловую мощность, передаваемую электродному покрытию от стержня через каплю, можно определить по формуле [316]

$$\Phi_{п.к} = \pi d_э \lambda_п (T_{пл} - T_0) (a_{ст}/a_п)^{1/2}, \qquad (3.26)$$

где $\lambda_п$ — теплопроводность покрытия; $a_{ст}$ — коэффициент диффузии для металла стержня; $a_п$ — коэффициент диффузии для покрытия.

Зависимость для определения величины $P_{\Omega п}$ приведена ниже (см. формулу (3.57)).

Составляющую тепловой мощности (теплового потока), передаваемой стержнем в покрытие [316]

$$\Phi_{п.ст}(t) = v_{пл}(t)\, \rho_п S_п c_{рп} [T_{ст}(t) - T_0], \qquad (3.27)$$

где $\rho_п$ и $S_п$ — плотность и площадь поперечного сечения покрытия; $T_{ст}$ — средняя температура центральной части стержня электрода.

В формуле (3.27) величиной $T_{ст}$ учитывается мощность, поступающая в покрытие от энергии дуги, и мощность от прохождения тока через электродный стержень.

Уравнение (3.26) применимо, когда глубина ввода тепла в покрытие незначительна по сравнению с толщиной покрытия. В противном случае в работе [316] предлагается рассчитывать величину $\Phi_{п.к}$ по формуле

$$\Phi_{п.к} = \lambda_{ст} S_{ст} \Delta T (p - p_0), \qquad (3.28)$$

где p — положительный корень уравнения,

$$p^2 + p p_0 (A - 1) - A p_0^2 (B + 1) = 0;$$

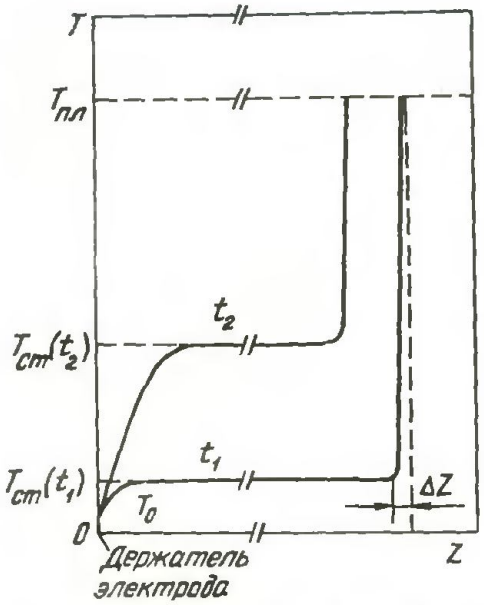


Рис. 96. Распределение температуры по оси электродного стержня в различные периоды времени ($t_2 > t_1$) [316].

$$p_0 = v_{пл}/a_{ст}; \qquad (3.29)$$

$$A = 2\pi d_{ст} a_{ст} a_п/(\Delta x S_п v_{пл}^2); \qquad (3.30)$$

$$B = S_{ст}\rho_{ст}c_{рст}/S_п\rho_п c_{рп}. \qquad (3.31)$$

Как указывалось выше, частично нагрев покрытия происходит передачей тепла путем теплопроводности от электродного стержня. На рис. 96 показано распределение температуры металла электродного стержня по его длине, типичное для процесса сварки покрытыми электродами. Как видно, температура T электродного стержня во всех точках, взятых по его длине, исключая участки начальный (контактирующий с электрододержателем) и конечный (вблизи расплавленного торца электрода), остается практически постоянной. При приближении к участкам, прилегающим к электрододержателю, температура нагрева стержня уменьшается; в то же время она резко возрастает в зонах, прилегающих к расплавленному торцу. Поэтому ясно, что аксиальный тепловой поток, способствующий плавлению покрытия, в рассматриваемых условиях появится только в этих двух переходных областях. Температура в средних частях электродного стержня за время сварки повышается.

Расчеты, приведенные в работе [317], показывают, что длина переходной области вблизи электрододержателя составляет порядка нескольких сантиметров, у фронта плавления (ΔZ, см. рис. 96) — около 1 мм. В области у фронта плавления стержень электрода имеет значительно большую температуру, чем покрытие. В результате в этой узкой области возникает существенный радиальный тепловой поток ($\Phi_п$), направленный от стержня к покрытию. Он и используется для нагрева и плавления покрытия.

Температуру покрытия можно определить по формуле

$$dT/dt = a_п \nabla^2 T \qquad (3.32)$$

при соответствующих граничных условиях.

Выражение $\nabla^2 T$ по данным [316], имеет порядок величины $\Delta T/\delta^2$ (δ — толщина покрытия, ΔT — разность температуры по толщине покрытия). При ручной дуговой сварке $\Delta T \approx 25$ °С [316].

Для расчета величины теплового потока Φ' в работе [316] предложены следующие упрощения (рис. 97).

1. Высота $h_к$ электродной капли постоянна и равна нескольким миллиметрам. Поэтому мы имеем дело или с каплей среднего размера, или рассматриваем ситуацию, когда существует непрерывный поток капель небольшого размера из капли, находящейся на торце электрода.

2. Тепло образуется на нижней поверхности капли ($z = h_к$), где $T = T_{пл} + \Delta T_к$ ($\Delta T_к$ — постоянная).

3. Расплавленный металл охлаждается до температуры $T_{пл}$ на границе раздела твердой и жидкой фаз; избыток тепла передается твердой фазе.

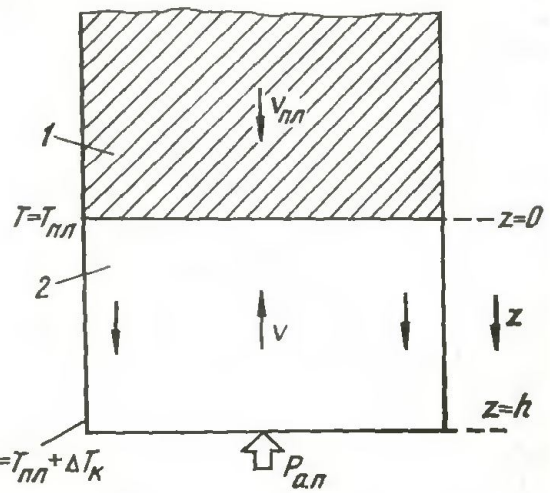


Рис. 97. Схема распространения теплоты.

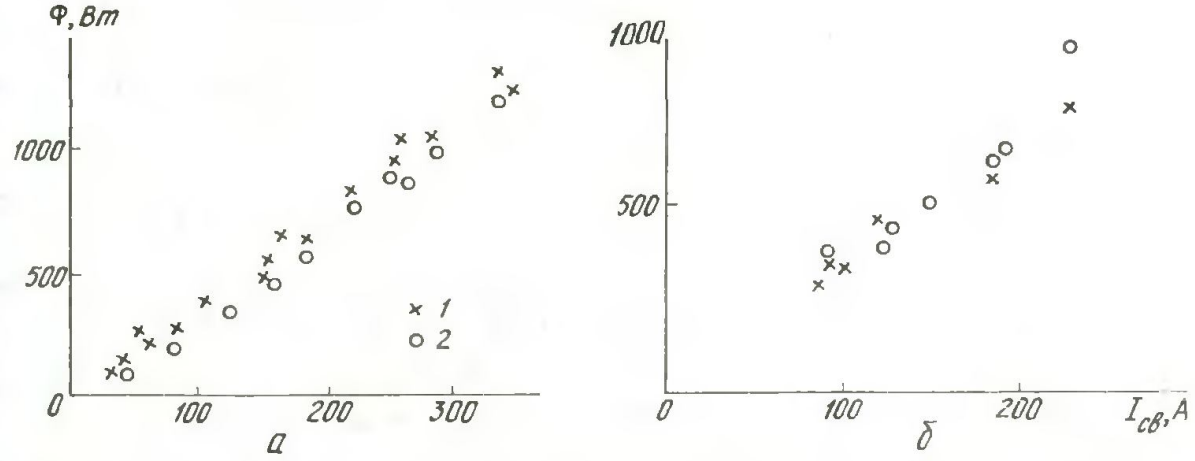


Рис. 98. Зависимость мощности теплового потока, передаваемого через расплавленную каплю, от тока при сварке электродами ($d_э$ = 1,75...5 мм) с рутиловым (*а*) и основным (*б*) покрытиями [316]: *1* — положительный полупериод; *2* — отрицательный (ток постоянный)

4. Электрод движется в z-направлении к отрицательному полюсу со скоростью $v_{пл}$, при этом граница плавления находится в фиксированном положении ($Z = 0$).

В связи с тем что влиянием джоулева тепла и теплового потока $\Phi_п$ пренебрегаем [316],

$$v_{пл} = \Phi/(S_{ст}\rho_{ст}H_{пл}). \qquad (3.33)$$

5. Пространственное распределение температуры не изменяется во времени. Тогда температуру центральной зоны можно выразить зависимостью [316]

$$T(z) = T_{пл} + \Delta T_к \frac{1 - \exp(-vz/a_э)}{1 - \exp(-\mathrm{Pe})}, \qquad (3.34)$$

где v — скорость распространения возрастающего теплового потока, $v = v_L - v_{пл}$; v_L — скорость теплового потока, вызванного электромагнитными силами; $a_э$ — коэффициент термической диффузии расплавленного металла электродов; z — аксиальная координата; $\mathrm{Pe} = vh_к/a_э$ [316].

Величину теплового потока, передаваемого металлу стержня от металла расплавленной капли, можно определить по уравнению [316]

$$\Phi = \frac{\lambda_к S^* \mathrm{Pe}\,\Delta T_к}{h_к[1 - \exp(-\mathrm{Pe})]}, \qquad (3.35)$$

где $\lambda_к$ — теплопроводность расплавленного металла капли; S^* — площадь поперечного сечения восходящего теплового потока; $\Delta T_к$ — постоянная, равная изменению температуры по высоте капли.

Рассмотрим граничные случаи: а) тепло переносится в основном теплопроводностью; при этом $\mathrm{Pe} \ll 1$, и из уравнения (3.35) получаем

$$\Phi \approx \lambda_к S^* \Delta T_к/h_к; \qquad (3.36)$$

б) при распространении тепла с помощью конвекции [316]

$$\Phi \approx \frac{S^* v_L \rho_э c_{pэ} \Delta T_к}{1 + S^* \rho_э c_{pэ} \Delta T_к / S_{ст}\rho_{ст}H_{пл}}, \qquad (3.37)$$

где $\rho_э$ — плотность расплавленного металла электрода.

На рис. 98 показана зависимость теплового потока Φ' от величины сварочного тока [316]. Видно, что эта зависимость в первом приближении носит линейный характер при сварке электродами как с рутиловым (рис. 98, *а*) так и основным (рис. 98, *б*) покрытиями. Это доказывает, что физические процессы, определяющие тепловые процессы при ручной дуговой сварке, имеют одну и ту же природу и описываются одними и теми же зависимостями независимо от типа электрода. Вместе с тем анализ экспериментальных результатов работы [316] показывает также, что тепловые потоки Φ', $\Phi_п$ и $\Phi_{ст}$ зависят от полярности тока, диаметра электрода и состава покрытия.

Величины энергий, обусловленных тепловыми потоками во время сварки $P_{а.п}$, $P_к$, Φ', $\Phi_{ст}$, $P_{и.к}$, $\Phi_{п.к}$, $\Phi_{п.д}$ (см. формулы, приведенные выше), определяются из выражений

$$Q_д = P_{а.п}t_{св}; \qquad (3.38)$$

$$Q_к = \int_0^{t_{св}} P_к(t)\,dt; \qquad (3.39)$$

$$Q' = \int_0^{t_{св}} \Phi'(t)\,dt; \qquad (3.40)$$

$$Q_{ст} = \int_0^{t_{св}} \Phi_{ст}(t)\,dt; \qquad (3.41)$$

$$Q_{п.к} = \int_0^{t_{св}} \Phi_{п.к}(t)\,dt; \qquad (3.42)$$

$$Q_{п.д} = \Phi_{п.д} t_{св}; \qquad (3.43)$$

$$Q_{и.к} = \int_0^{t_{св}} P_{и.к}(t)\,dt; \qquad (3.44)$$

$$Q_{л.к} = P_{л.к} t_{св}, \qquad (3.45)$$

где $Q_д$, $Q_{ст}$ — тепловая энергия, получаемая электродом вследствие процессов, соответственно происходящих в дуге и при прохождении электрического тока через стержень; $Q_к$ — энергия дуги, поглощенная каплей на торце электрода. Отметим, что в выражении (3.4) не учтена тепловая мощность, теряемая при переносе капель.

Согласно А. А. Ерохину [50], потери теплоты за время сварки, вызванные отрывом от торца и переходом в сварочную ванну части расплавленного металла (перенос капель), составляют

$$Q_р = \varepsilon\sigma F T_{0к}^4 \int_0^{t_{св}} (1 + 3A_2 T_{0к}^3 t)^{-4/3}\,dt, \qquad (3.46)$$

где A_2 — постоянная.

Последнее выражение получено в работе [50] при допущении, принятом для упрощения расчетов, что температура окружающей среды $T_с = 0$.

Определив тепловую энергию $Q_р$ из выражения (3.46), и отнеся ее к массе капли, получим [50]

$$Q_р/m_п = cT_0\left[1 - \left(1 + \frac{3\varepsilon\sigma F}{cm_п} T_0^3 t_{св}\right)^{-1/3}\right]. \qquad (3.47)$$

где $m_п$ — средняя масса переходящих капель; c — теплоемкость металла.

По оценочным расчетам А. А. Ерохина, потери тепловой энергии зависят от типа переноса (с увеличением массы переходящих капель они возрастают) и относительно малы [50].

Потери тепла на излучение $Q_{л.п}$ и конвекцию $Q_{конв.п}$ с наружной поверхности покрытия в окружающую среду определяются по формулам

$$Q_{л.п}(t) = \int_0^{t_{св}} P_{л.п}(t)\,dt; \qquad (3.48)$$

$$Q_{конв.п}(t) = \int_0^{t_{св}} P_{конв.п}(t)\,dt. \qquad (3.49)$$

Тепловые мощности $P_л$ и $P_{конв.п}$ можно определить из выражений

$$P_{л.п}(t) = \pi d_э l_э(t)\,\sigma\,[T_{ст}^4(t) - T_0^4]; \qquad (3.50)$$

$$P_{конв.п}(t) = \pi d_э l_э(t)\,\beta\,[T_{ст}(t) - T_0], \qquad (3.51)$$

где β — коэффициент теплопередачи для естественной конвекции. Для расчетов можно принимать $\beta = 10$ Вт/(м² · °С) [316].

В последних выражениях посредством температуры $T_{ст}$ учитывается энергия, выделяемая в стержне вследствие прохождения электрического тока (кроме энергии, поступающей от дуги).

Передача тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока. Тепловая энергия $Q_Ω$, выделяемая при прохождении тока через электродный стержень, вызывает постепенное повышение температуры электродного стержня и капли, а также вследствие теплопередачи — температуры покрытия электрода (см. рис. 94, *б*):

$$Q_Ω = Q_{Ωст} + Q_{Ωп}. \qquad (3.52)$$

При сварке покрытыми электродами стабильный процесс сварки обеспечивается только тогда, когда верхний конец электрода, контактирующий с электрододержателем, не должен размягчаться до полного сгорания электрода. В связи с этим при ручной дуговой сварке температура нагрева электрода и плотность тока в нем строго ограничены. Поэтому влияние выделяемой мощности, вызванной нагревом электрода от прохождения тока, на скорость плавления электрода незначительно [50, 316] и составляет по приближенным оценкам менее 1 %.

Энергия, получаемая в результате выделения джоулева тепла в электродном стержне, имеет вид

$$Q_Ω = \int_0^{t_{св}} P_Ω(t)\,dt, \qquad (3.53)$$

где P_Ω — тепловая мощность, выделяющаяся в стержне электрода,

$$P_\Omega(t) = I_{св}^2 \rho_э'(t)\, l_э(t)/S_{ст}, \qquad (3.54)$$

Величину $P_{\Omega ст}$ можно найти также по формуле [316]

$$P_\Omega(t) = v_{пл}(t)\, \rho_{ст} S_{ст} H(t), \qquad (3.55)$$

где $\rho_э'$ — удельное сопротивление металла стержня.

При ручной дуговой сварке, как уже отмечалось, температура нагрева электрода и плотность тока в нем ограничены, поэтому влияние мощности (3.54) на скорость плавления электрода незначительно [50, 316].

Энергия, поглощаемая покрытием,

$$Q_{\Omega п} = \int_0^{t_{св}} P_{\Omega п}(t)\, dt. \qquad (3.56)$$

Мощность, вводимая в покрытие в результате выделения тепла при прохождении электрического тока через стержень, определяется

$$P_{\Omega п} = \frac{\pi d_э l_э \lambda_п [T_{\Omega ст}(t) - T_0]\, a_{ст}}{a_п (d_э + 2\delta)}, \qquad (3.57)$$

где $T_{\Omega ст}(t)$ — температура нагрева стержня проходящим током, зависящая от времени сварки, δ — толщина покрытия на сторону.

Исходя из принятой модели распространения тепла полные энергии, поглощаемые электродным стержнем и вводимые в покрытие, имеют вид

$$Q_{ст} = Q_{д.ст} + Q_{\Omega ст}; \qquad (3.58)$$

$$Q_п = Q_{д.п} + Q_{\Omega п}. \qquad (3.59)$$

Уравнение баланса энергии при сварке покрытыми электродами можно представить следующим образом:

$$Q_д + Q_\Omega = Q_{ст} + Q_п + Q_к - Q_и - Q_л + Q_{\Omega ст} + Q_{\Omega п} + Q_л' - Q_{конв}' \pm Q_{хим} - Q_{л.п} - Q_{конв.п} - Q_р, \qquad (3.60)$$

где $Q_п$ — энергия дуги, поглощенная покрытием на торце электрода; $Q_и$ и $Q_л$ — потери энергии на испарение и излучение; $Q_л'$ и $Q_{конв}'$ — тепловая энергия, соответственно получаемая электродной каплей от столба дуги и ванны и передаваемая обтекающему газовому потоку; $Q_{хим}$ — энергия химических реакций в капле.

Ниже приведены результаты расчетов основных составляющих баланса энергий [316] ($Q_2 = Q_{д.п} + Q_{д.ст}$):

Составляющая энергии	$Q_д$	$Q_к$	$Q_{д.п}$	$Q_{д.ст}$	$Q_{\Omega ст}$	$Q_{\Omega п}$	$Q_{кон.п}$	$Q_{л.п}$
Величина энергии	35—45	10—15	2,6	20,6	1,3	1,2	0,1	0,1

Видно, что при сварке покрытыми электродами определяющими являются процессы генерирования тепла, происходящие в активных пятнах на торце электрода. Тепло, выделяемое вследствие прохождения электрического тока через стержень (джоулево тепло), в реальных режимах, характерных для ручной дуговой сварки, составляет небольшую (порядка 6 %) часть всей энергии, вводимой в стержень электрода.

2. Температура капель электродного металла

Температура, как известно, является важнейшим, а в ряде случаев — определяющим параметром металлургических процессов, происходящих при дуговой сварке металлов. Знание температурных условий необходимо прежде всего при оценке кинетики металлургических процессов, в том числе процессов абсорбции газов расплавленным металлом, раскисления металла, его дегазации и т. д. Вместе с тем определение температуры, особенно на стадии плавления электродного металла, сопряжено с большими трудностями, связанными с кратковременностью существования, малыми объемами металла и большими градиентами температур. Наличие шлака, большого количества выделяющихся газов и втулочки из неоплавившегося покрытия на торце электрода также затрудняет изучение температуры электродного металла.

По этой причине до последнего времени сварщики располагали лишь приближенными данными о температуре электродно-

го металла, полученными в условиях сварки тонкопокрытыми или голыми электродами. Состав и толщина покрытия, несомненно, оказывают влияние на температуру электродного металла. Существовавшие ранее методы измерения не позволили оценить это влияние и тем более не были пригодны для определения градиента температур в капле электродного металла в процессе ее существования на торце электрода.

Ниже приведены имеющиеся в литературе сведения о температуре металла электродных капель, изложена разработанная методика определения температуры капель при сварке покрытыми электродами и результаты выполненных с помощью этой методики измерений.

Опытные данные. Наибольшее распространение получил метод калориметрирования. Впервые им воспользовался В. И. Шумкин [221]. В его опытах дуга переменного тока горела между электродами из низкоуглеродистой стали с меловым покрытием. Получены следующие результаты:

Ток, А	125—135	185—195	235—240
Температура капель, К	2360±40	2518±45	2613±50

Аналогичным методом А. А. Кульчицкий [83] получил данные о теплосодержании капель при сварке покрытыми электродами при токе 200—240 А, что с учетом современных значений физических констант железа [148] соответствует температуре (2580 ± 30) К.

По данным А. А. Ерохина [49], полученным калориметрированием расплавленных капель в водяном калориметре, с изменением тока в широком диапазоне температура капель колеблется от 2100 до 2700 К.

Этим же методом Д. К. Безбахом [13] исследована температура капель при сварке электродами ОММ-5 и УОНИ-13/45. При плотности тока 12 А/мм^2 температура определена соответственно 2430 и 2630 К.

М. Озава и Т. Морита [290] с помощью калориметрирования установили, что теплосодержание капель электродного металла при сварке голыми электродами соответствует температуре 2170—2200 К, при сварке меловыми электродами — 2200—2450 К.

Указанный метод приемлем для определения температуры капель при сварке голым стержнем или электродом с тонким покрытием, когда можно пренебречь долей тепла, вносимой шлаком. При расплавлении толстопокрытых электродов количество шлака достигает 20—40 % от массы расплавленного металла. Отсутствие же данных о теплоемкости шлаков при высоких температурах не позволяет точно оценить их вклад в теплосодержание металла капель.

Помимо калориметрирования, известен также метод микропирометрии [292], но и он непригоден для исследования температуры капель электродов с нормальной и увеличенной толщиной покрытия из-за втулки, образующейся на торце электрода при его плавлении.

Таким образом, данные исследований температурной обстановки на торце электрода нуждаются в уточнениях и дополнениях. Сведения о влиянии на температуру капель состава покрытия и его толщины, о распределении температуры по объему капли при сварке электродами с многокомпонентным покрытие с коэффициентами массы покрытия до 100 % отсутствуют.

Учитывая это, В. Н. Горпенюк и И. К. Походня разработали метод прямого измерения температуры металла капли, находящейся на торце толстопокрытого электрода, с помощью термопары погружения.

Методика определения температуры капель [78, 148, 152]. Температура капли на торце электрода измеряется вольфрам — вольфрам-рениевой термопарой ВР 5/20, помещенной в центральную часть электродного стержня. Погружаясь по мере оплавления электрода в каплю, горячий спай термопары пересекает ее по оси вплоть до поверхностного слоя металла, непосредственно граничащего с приэлектродной областью дуги. Тем самым обеспечивается возможность оценки распределения температуры по объему капли.

Схема подготовки электрода приведена на рис. 99. В электродном стержне диаметром 8 мм фрезеровался продоль

ный паз. Для электродов меньшего диаметра использовались толстостенные трубки из малоуглеродистой стали. Методом опрессовки на стержень наносилось покрытие *2*. В паз при этом вводилась специальная вставка, исключающая попадание в него обмазочной массы. После опрессовки вставка извлекалась и электроды подвергались сушке и прокалке по принятому режиму. Перед сваркой в паз или канал через отверстие в покрытии вводилась вольфрам — вольфрам-рениевая термопара ВР 5/20, горячий спай которой *3* не защищен и может непосредственно контактировать с расплавленным металлом капли. Термоэлектроды вблизи от спая изолировались тонкостенным двухканальным капилляром *4* и стекловолокном *5*. По мере расплавления электрода наступает момент, когда граница плавления достигает спая термопары и он погружается в жидкий металл капли.

ТермоЭДС, сварочный ток и напряжение дуги регистрировались осциллографом 8SO-4 фирмы ПФТ (ГДР). Сварку выполняли автоматом Об-613 со скоростью 3 м/ч с питанием дуги от трансформатора ТСД-500.

Защитные капилляры изготовлялись из обезжелезенного циркона ($T_{пл}$ = = 2693 К) методом экструзии на парафиновой связке с использованием специальной фильеры. Опрессованные капилляры подвергались длительному обжигу в глиноземе при T = 1400 К, затем спекались при T = 1900 К. Изготовленные капилляры не электропроводны при высоких температурах.

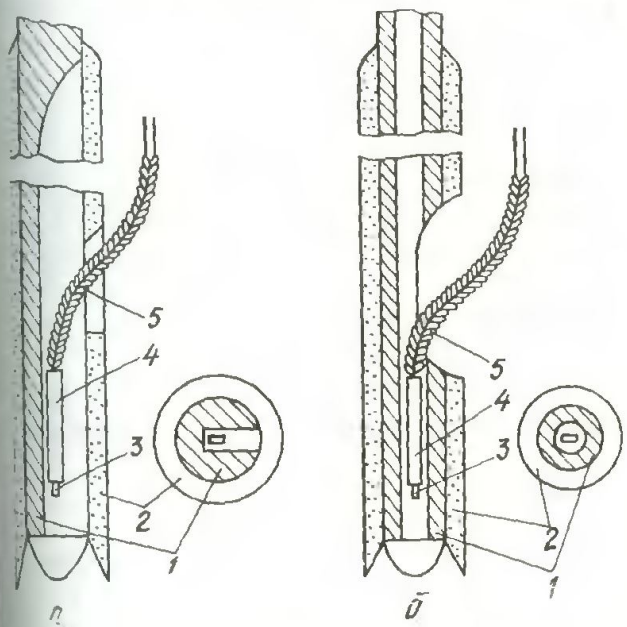


Рис. 99. Схема подготовки электрода для измерения температуры капли термопарой погружения:

а — стержень с разрезом; *б* — стержень грубчатого сечения; *1* — стержень; *2* — покрытие; *3* — термопара; *4* — защитный капилляр; *5* — стекловолокно.

Таблица 21. **Распределение температуры по высоте капли**

$I_{св}$, А	Высота капли, мм	Диапазон зарегистрированных мгновенных температур, К	Средняя величина мгновенной температуры *, К
250	0,6	2070—2110	2090
	1,8	2070—2110	2090
	3,6	2090—2150	2130
	6,0	2170—2270	2210
	7,8	2320—2320	2320
360	0,7	2010—2170	2080
	2,1	1990—2320	2170
	4,2	2050—2570	2290
	6,3	2200—2480	2370
	7,7	2370—2470	2430
530	1,1	2110—2200	2150
	2,2	2140—2200	2170
	4,4	2120—2370	2220
	6,6	2200—2450	2330
	8,8	2620—2620	2620

* По данным трех измерений.

При обработке осциллограмм определялись температура поверхности капли $T_{макс}$ и средняя температура капли на оси электрода в интервале $T_{пл}$ — $T_{макс}$.

Как показала рентгенокиносъемка [148, 159], при плавлении электродов с рутиловым покрытием образуется капля конической формы, от которой с большой частотой отделяются мелкие капли. У электродов с покрытием основного вида образуются крупные, медленно растущие сферические капли, которые почти полностью переходят в ванну по достижении критического объема.

В электродах с мелкокапельным переносом удавалось регистрировать температуру поверхности капли в течение времени, которое в несколько раз превышало продолжительность полного обновления металла капли. Измеренная таким образом температура названа установившейся ($T_{уст}$). Она представляет собой среднюю температуру поверхностного слоя металла капли.

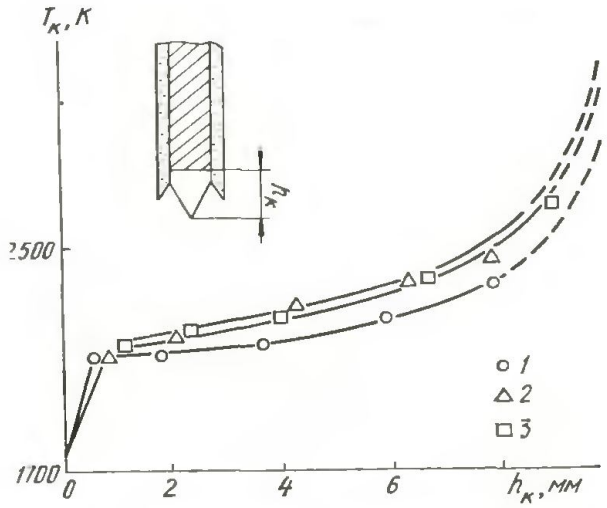


Рис. 100. Распределение температуры по высоте капли при сварке рутиловыми электродами АНО-4 $d_э = 8$ мм:
1 — $I_{св} = 250$ А; *2* — 260 А; *3* — 530 А.

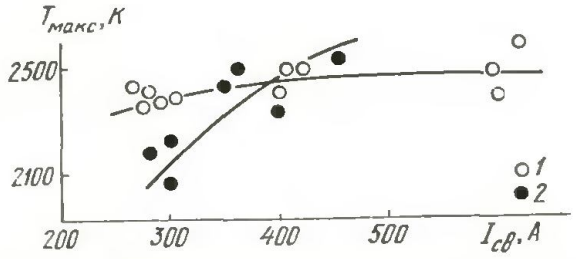


Рис. 101. Зависимость температуры капель электродов диаметром 8 мм с основным СМ-11 (*1*) и руднокислым ЦМ-7 (*2*) покрытием от тока сварки.

Анализ ошибок измерений позволяет утверждать, что их точность находится в пределах $\pm$ 5 %.

Распределение температуры в капле. Сварка проводилась рутиловыми электродами марки АНО-4 диаметром 8 мм. Жидкая капля на торце такого электрода имеет довольно правильную коническую форму. В диапазоне токов 250—500 А масса капли изменяется мало [148]. Местонахождение конца термопары рассчитывалось исходя из скорости плавления электрода и массы капли.

В табл. 21 показано распределение температуры по высоте капли в зависимости от величины сварочного тока. На рис. 100 по средним значениям температур построен график распределения температуры по высоте капель. С повышением величины тока градиент температуры по высоте капли увеличивается. Максимально зарегистрированная температура при токе 530 А равна 2620 К.

Влияние режима сварки, состава покрытия и диаметра электрода на температуру капли. В опытах использовались электроды, изготовленные из стержней диаметром 8 мм и толстостенных трубок диаметрами 5 и 6 мм. Зависимость температуры от тока для трех типов электродов, построенная по экспериментальным значениям $T_{макс}$, приведена на рис. 101, 102 и в табл. 22. С увеличением тока в исследованных электродах всех типов температура капель возрастает. При сварке на номинальном токе ($I_{св} \approx 350$ А) температуры капель электродов разных типов различаются незначительно; у руднокислых электродов температура несколько выше, что объясняется экзотермическим характером реакций, протекающих при плавлении покрытий такого типа.

Наиболее широкий диапазон изменения температуры капель зафиксирован у электродов с основным покрытием, что связано с крупнокапельным переносом [76]. В электродах с мелкокапельным переносом (рутиловое и руднокислое покрытие) существенное увеличение сварочного тока против номинального значения практически не сказывается на температуре капель (—0,2—0,26 К/А), повышается лишь скорость плавления электрода. При крупнокапельном переносе, когда капля на торце электрода существует длительное время (основной вид покрытия), варьирование величины тока в небольших пределах вызывает довольно резкое изменение температуры капель (2 К/А). Примечательно, что на малом токе температура капель электродов этого вида значительно ниже по сравнению с электродами с рутиловым и руднокислым покрытием.

Измерения показали, что температура поверхности капель $T_{макс}$ электродов

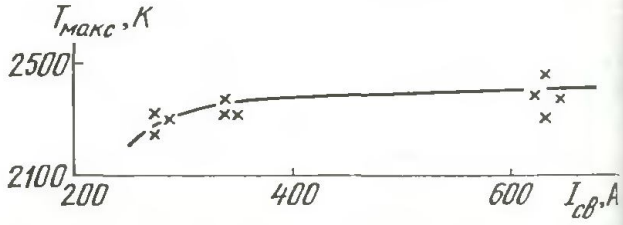


Рис. 102. Зависимость максимально зарегистрированной температуры капель электродов АНО-4 ($d_э = 8$ мм) от тока сварки.

Таблица 22. **Влияние тока и состава покрытия на температуру капель**

Электрод	Коэффициент массы покрытия, %	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$T_{макс}$, К	$T_{уст}$, К	$T_{ср}$, К
АНО-4	45	280	25	2270—2340 / 2310 (3)	2240—2320 / 2290 (3)	2140—2170 / 2155 (2)
		340—350	26	2320—2380 / 2340 (3)	—	2160—2170 / 2165 (3)
		620—640	28—29	2300—2470 / 2380 (4)	—	2070—2220 / 2130 (4)
ЦМ-7	45	270—300	26—28	2360—2420 / 2380 (5)	—	—
		400—420	27	2380—2470 / 2440 (3)	2370—2440 / 2405 (3)	—
		600—620	30—32	2370—2570 / 2470 (3)	—	—
СМ-11	42	280—300	22—27	2073—2200 / 2150 (3)	1970—2200 / 2085 (2)	1940—2030 / 1990 (3)
		350—360	25—26	2420—2470 / 2245 (2)	2370—2420 / 2395 (2)	2100—2220 / 2160 (2)
		400	28	2320	2280	—
		450	28	2370—2520 / 2445 (2)	2370—2520 / 2445 (2)	—

Примечания: 1. Здесь и в табл. 23—25 над чертой — минимальные и максимальные значения, под чертой — среднее значение, в скобках — число опытов. 2. Диаметр стержня 8 мм.

диаметром 8 мм находится в пределах 2150—2570 К. Температура капель электродов с диаметром стержней 5 и 6 мм при сравнимых плотностях тока также не выходит из этих пределов (табл. 23).

Влияние напряжения на дуге показано на рис. 103. Напряжение $U_д$ увеличивали, удлиняя дугу. Видно, что напряжение на дуге способствует увеличению температуры поверхности капель $T_{макс}$ лишь до определенного момента, затем температура начинает снижаться.

Таблица 23. **Температура капель электродов диаметром 5 и 6 мм**

$I_{св}$, А	$U_д$, В	Наружный диаметр стержня, мм	$K_{м.п}$, %	$T_{макс}$, К
150—170	22—24	6	46	2260—2370 / 2310 (5)
300	25	6	46	2260—2420 / 2340 (3)
120—160	24—25	5	45	2260—2370 / 2330 (3)

Влияние толщины покрытия электрода на температуру капель. Температуру капель определяли на рутиловых электродах марки АНО-4. Применялись стержни диаметром 8 мм, величина сварочного тока составляла 400 А (табл. 24). С увеличением толщины покрытия температура капель несколько снижается (рис. 104). Это, по-видимому, связано с возрастанием количества тепла, расходуемого на плавление покрытия. Дальнейшее повышение температуры капель с

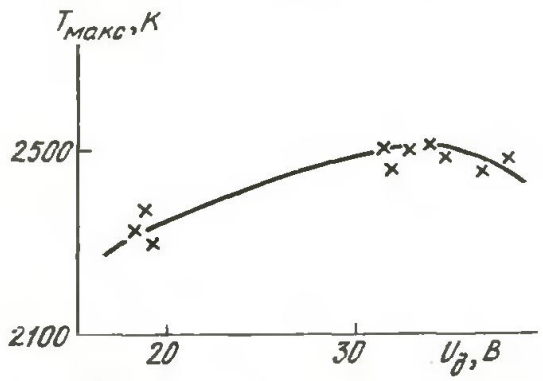


Рис. 103. Зависимость температуры капель от напряжения дуги.

Таблица 24. **Влияние толщины покрытия на температуру капель электродного металла**

$I_{св}$, А	$U_д$, В	$K_{м.п}$, %	$T_{макс}$, К	$T_{уст}$, К	$T_{ср}$, К
395	27—29	16	2420—2510 2470 (4)	2370—2440 2405 (2)	2220 (1)
400	27—30	45	2170—2470 2330 (5)	2370—2470 2420 (2)	1970—2020 1995 (2)
400	29—32	70	2340—2370 2360 (3)	2370 (2)	2090—2220 2155 (2)
400	30—32	100	2420—2470 2440 (3)	2420 (1)	2150—2170 2160 (2)

увеличением $K_{м.п}$ до 100 %, на наш взгляд, происходит благодаря наличию глубокой втулки из покрытия, значительно уменьшающей тепловые потери. В этой серии опытов поддерживалось постоянное напряжение дуги путем изменения ее длины. Поэтому на электродах с $K_{м.п}$, равным 15,8 и 44 %, длина дуги была больше нормальной. При оптимальной для каждой толщины покрытия длине дуги реальная температура капель может несколько измениться.

Влияние железного порошка на температуру капель. В качестве шлакообразующей основы использовалось покрытие электродов марки АНО-4. В сухую шихту добавляли различные количества порошка марки ПЖ-2С. Наружный диаметр покрытия выдерживался постоянным, при этом коэффициент массы покрытия изменялся незначительно ($K_{м.п}$ = = 45...49 %).

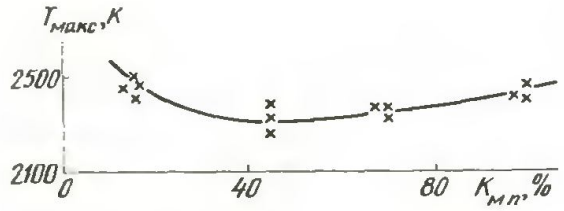


Рис. 104. Зависимость температуры капель от коэффициента массы покрытия электродов АНО-4 ($d_э$ = 8 мм).

Результаты измерений представлены в табл. 25 и на рис. 105. При введении в покрытие до 50 % (по массе) порошка температура капель несколько увеличивается. Такой характер зависимости в какой-то мере может быть объяснен тем, что железный порошок уменьшает количество шлакообразующих в покрытии и тем самым способствует снижению затрат тепла на плавление покрытия, так как при этих температурах теплосодержание железа значительно ниже теплосодержания шлака, поэтому металл капель получает дополнительное количество тепла и перегревается. При содержании железного порошка около 70 % покрытие становится электропроводным, в связи с чем значительная часть сварочного тока мо-

Таблица 25. **Влияние железного порошка в покрытии на температуру капель электродного металла**

Содержание железного порошка, %	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$T_{макс}$, К	$T_{уст}$, К	$T_{ср}$, К
30	400—420	21—27	2400—2470 2430 (4)	2400—2420 2415 (3)	2070—2170 2140 (3)
50	400—420	25—27	2420—2560 2500 (5)	2420—2500 2460 (2)	2170 (1)
70	400—420	25	2300—2420 2380 (4)	2370 (2)	2170 (2)

жет шунтироваться покрытием. Это будет способствовать уменьшению температуры капель.

Таким образом, если предположить, что более высокая температура капель благоприятно влияет на устойчивость горения дуги в результате увеличения плотности тока термоэмиссии, то железный порошок должен улучшить стабильность дуги на переменном токе, что хорошо согласуется с практикой.

По результатам проведенных исследований можно заключить следующее.

1. Температура капли по высоте распределяется неравномерно. Градиент температур в капле повышается с ростом тока незначительно. Температура капли вблизи поверхности достигает 2600 К.

2. С увеличением тока при сварке электродами с мелкокапельным переносом — руднокислыми и рутиловыми — температура капель изменяется незначительно (0,2—0,26 К/А). У электродов с основным покрытием (крупнокапельный перенос) эта зависимость выражена значительно сильнее (2 К/А). При сварке электродами этого типа на малых токах зафиксирована наиболее низкая температура капель.

3. Увеличение длины (напряжения) дуги сначала способствует повышению температуры капель, при дальнейшем удлинении дуги температура капель снижается.

4. С ростом содержания железного порошка до 50 % температура капель растет и достигает $T_{макс} = 2500$ К. Дальнейшее увеличение содержания железного порошка способствует некоторому снижению температуры капель.

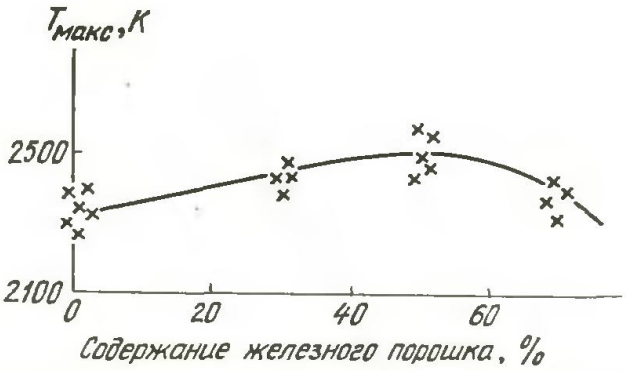


Рис. 105. Зависимость температуры капель электродов АНО-4 ($d_э = 8$ мм) от содержания железного порошка в покрытии.

3. Процессы в твердой фазе

Кинетика диссоциации смесей карбонатов с оксидами и металлами. Электродные покрытия представляют собой тесную смесь мелкоизмельченных материалов с различными физическими и химическими свойствами, скрепленных на жидком стекле. Нагрев и плавление таких смесей сопровождается диссоциацией карбонатов, оксидов, фторидов, деструкцией органических соединений, взаимодействием между компонентами, испарением влаги и пр. При нагреве в покрытии еще до его расплавления протекают химические реакции в твердом состоянии. Эти реакции (диссоциация химических соединений, окисление железа и легирующих элементов и др.) интенсифицируются с повышением температуры и протекают с тем большей полнотой, чем больше продолжительность нагрева. Они оказывают существенное влияние на взаимодействие расплавленного металла с газами и шлаком и во многом определяют технологические показатели сварки. Поэтому изучение процессов, протекающих при нагреве сварочных материалов, имеет большое теоретическое и практическое значение.

Кинетика процессов, протекающих при нагреве смесей порошков. Особенности диссоциации карбонатов в смесях. Изучению процессов, протекающих при нагреве электродных покрытий и флюсов, посвящены работы [21, 26, 49, 140, 142, 178, 207]. Исследования процессов, протекающих в смесях твердых веществ при нагреве, проведены в ИЭС им. Е. О Патона с помощью комплексного термического, рентгеноструктурного и химического методов анализа В. Н. Шлепаковым [220]. Основные результаты этих исследований изложены ниже.

Из большого числа реакций в смесях твердых веществ для композиций сварочных материалов наиболее важны реакции разложения веществ, образующих защитную газовую атмосферу, реакции окисления, а также реакции, предшествующие шлакообразованию и сопровождающие его.

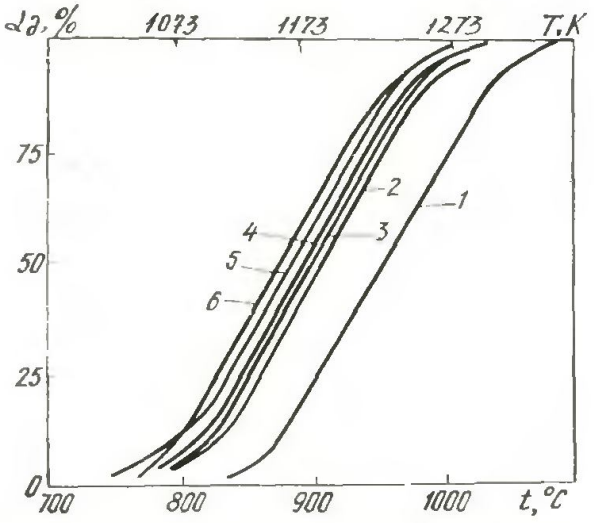


Рис. 106. Зависимость степени диссоциации карбоната кальция от температуры при пропорциональном нагреве его в двойных смесях:
1 — $CaCO_3$; *2* — $CaCO_3 + CaF_2$; *3* — $CaCO_3 + TiO_2$; *4* — $CaCO_3 + SiO_2$; *5* — $CaCO_3 + Al_2O_3$; *6* — $CaCO_3 + Na_2CO_3$.

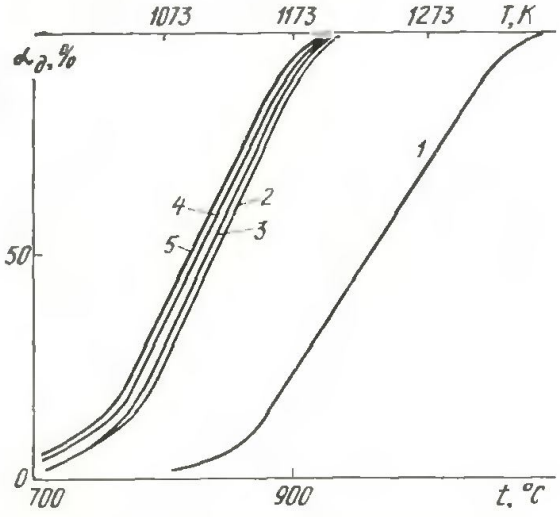


Рис. 107. Зависимость степени диссоциации карбоната кальция от температуры при пропорциональном нагреве его смесей с металлическими порошками:
1 — $CaCO_3$; *2* — $CaCO_3$ + FeMn; *3* — $CaCO_3$ + Fe; *4* — $CaCO_3$ + FeTi; *5* — $CaCO_3$ + FeAl.

Органические газообразующие материалы, используемые в композициях ряда порошковых проволок и электродных покрытий (крахмал, целлюлоза), представляют собой высокомолекулярные углеводы, состав которых может быть выражен как $C_6H_{10}O_5$. В общем виде реакции разложения органических составляющих сварочных материалов при нагреве сопровождаются выделением тепла и происходят по схеме

$$C_n(H_2O)_{n-1} \rightarrow (n-1)\,CO + (n-1)\,H_2 + C. \quad (3.61)$$

Исследование диссоциации крахмала и целлюлозы в смесях с минеральными добавками и металлическими порошками показало, что наличие примесей не приводит к существенному смещению температурного интервала диссоциации. Разложение органических материалов в смесях протекает при температурах ниже 400 °С. Крахмал, например, начинает разлагаться при температуре 240—270 °С с выделением оксидов углерода и паров воды.

Карбонаты в шихте электродных покрытий и сердечнике порошковых проволок чаще всего используют в виде природных минералов — магнезита ($MgCO_3$), мрамора ($CaCO_3$), доломита ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) и др.

Добавление оксидов, фторидов и металлических порошков приводит к смещению температурного интервала диссоциации карбонатов (рис. 106, 107). Добавление порошков железа и алюминия к карбонатам магния и кальция вызвало значительное смещение температурного интервала их диссоциации в область более низких температур, что связано прежде

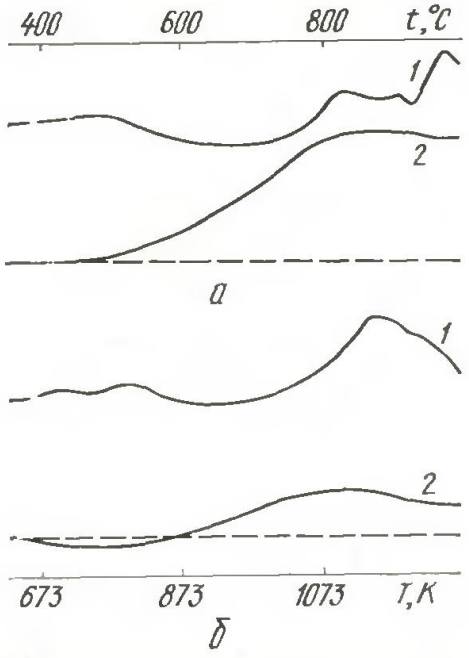


Рис. 108. Кривые термоанализа смесей карбоната натрия с диоксидом титана (*а*) и порошком железа (*б*):
1 — кривые ДТА; *2* — кривые ТГА.

де всего с улучшением теплопроводности смеси и развитием экзотермических реакций окисления.

Карбонат натрия разлагается при относительно низких температурах при наличии в смеси веществ, способных связать образующийся оксид натрия, например, по схеме

$$Na_2CO_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2SiO_3 + CO_2. \quad (3.62)$$

На рис. 108 приведены кривые дифференциального термического (ДТА) и термогравиметрического (ТГА) анализа смесей карбоната натрия с диоксидом титана (при равных долях компонентов в смеси) и порошком железа. Наибольший температурный диапазон выделения углекислого газа наблюдается у смесей порошков, содержащих помимо карбоната магния или кальция карбонат натрия и шлакующую примесь (рис. 109). В процессе нагрева такой смеси разлагаются оба карбоната, причем разложение происходит через промежуточные реакции образования легкоплавких эвтектик и двойных карбонатов $CaNa_2(CO_3)_2$ или $MgNa_2(CO_3)_2$.

При наличии шлакующей примеси карбонат разлагается. С кремнеземом он взаимодействует по схеме

$$CaNa_2(CO_3)_2 + 2SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + Na_2SiO_3 + 2CO_2. \quad (3.63)$$

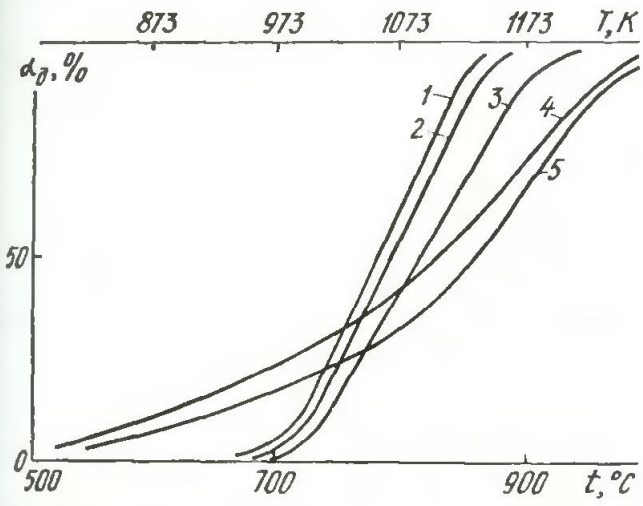


Рис. 109. Зависимость степени диссоциации карбоната от температуры (кривые ТГА) при пропорциональном нагреве многокомпонентных смесей с карбонатом кальция:

1 — $CaCO_3 + CaF_2 + TiO_2$; *2* — $CaCO_3 + CaF_2 + Al_2O_3$; *3* — $CaCO_3 + CaF_2 + SiO_2$; *4* — $CaCO_3 + CaF_2 + Al_2O_3 + Na_2CO_3$, *5* — $CaCO_3 + CaF_2 + TiO_2 + Na_2CO_3$.

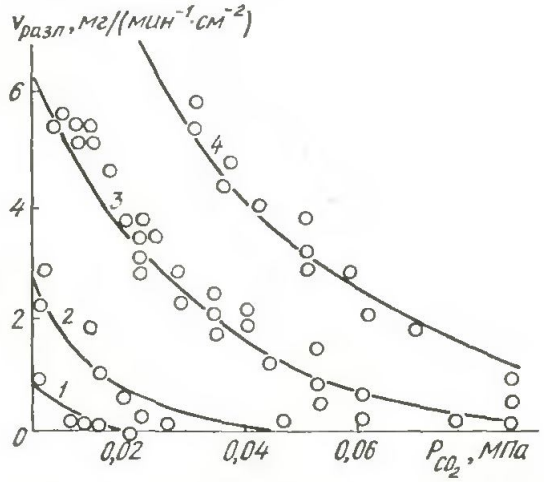


Рис. 110. Зависимость скорости диссоциации карбоната кальция от парциального давления углекислого газа и температуры:

1 — $T = 1073$ К; *2* — 1123 К; *3* — 1173 К; *4* — 1223 К [69].

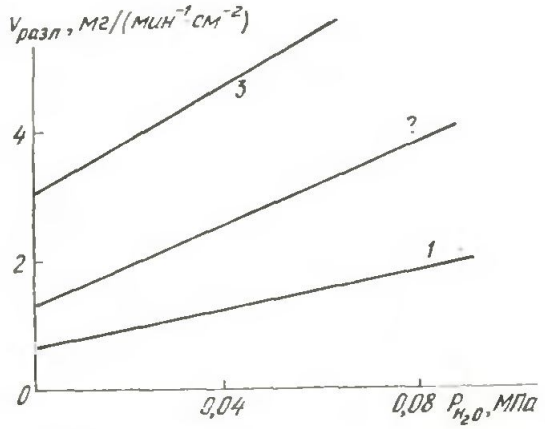


Рис. 111. Зависимость скорости диссоциации карбоната кальция от парциального давления водяного пара и температуры:

1 — $T = 1023$ К; *2* — 1073 К; *3* — 1123 К [69]

Появление жидкой фазы в результате плавления Na_2CO_3, а также эвтектик и двойных солей в системах с участием карбоната натрия способствует энергичному протеканию процессов силикатообразования [74]. Образование расплава в этих условиях может ограничивать отвод углекислого газа от реагирующих частиц карбоната.

Основными факторами, способствующими инициированию и ускорению диссоциации, являются улучшение условий подвода тепла к частицам карбоната, снижение парциального давления углекислого газа вследствие окисления примесей, экзотермичность реакций окисления, взаимодействие компонентов смеси с продуктом диссоциации.

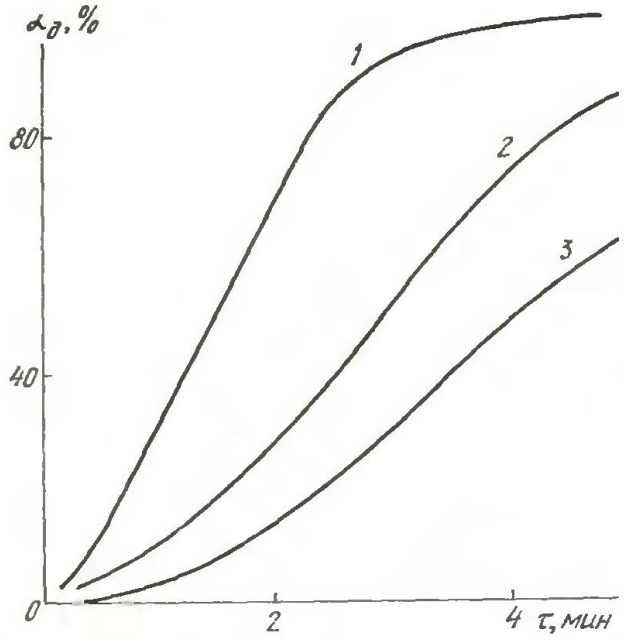


Рис. 112. Кинетика диссоциации карбоната кальция при изотермической выдержке его смесей (T = 1093 К):
1 — с FeTi; *2* — с SiO_2; *3* — с $BaCO_3$.

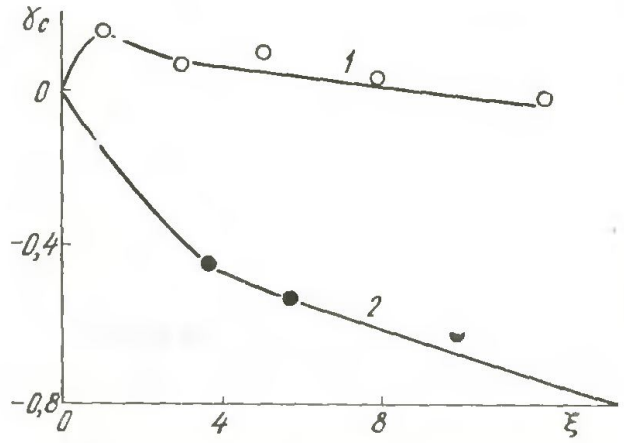


Рис. 113. Зависимость степени окисленности углерода от окислительной способности смеси при нагреве в смесях с мрамором доменного (*1*) и электротермического (*2*) ферромарганца [50].

О влиянии давления углекислого газа на скорость разложения карбоната $v_{разл}$ можно судить по данным, приведенным на рис. 110. Эти зависимости справедливы для условий, когда диссоциация протекает путем продвижения фронта реакции в глубь исходной фазы.

Наличие примесей, как указывалось, изменяет кинетику диссоциации. Ускоряющее влияние на диссоциацию карбонатов могут оказывать пары воды. На рис. 111 приведены зависимости скорости разложения карбоната кальция от давления паров воды в атмосфере состава $N_2 + H_2O$ при различных температурах [69].

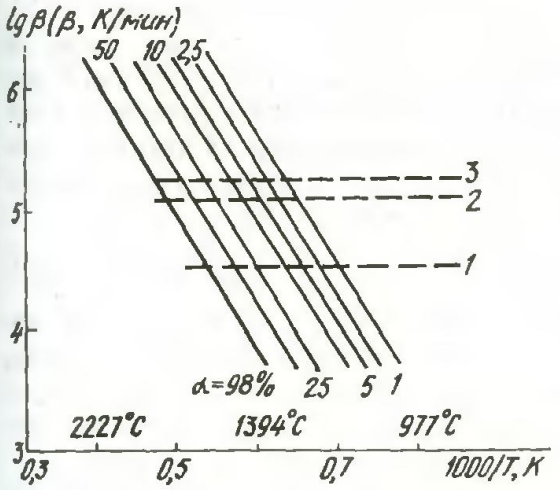
Количество твердой примеси оказывает влияние, подобное газообразному катализатору (см. рис. 108). Каталитическое влияние примесей объясняется увеличением скорости образования устойчивых форм основных оксидов.

С момента возникновения границы раздела между карбонатом и образовавшимся оксидом процесс диссоциации приобретает автокаталитический характер [69, 54]. Однако ускоряющее действие оксида тормозится вследствие затруднения подвода тепла к границе раздела карбоната с оксидом, а также уменьшения поверхности раздела.

В присутствии примеси изменяется и характер выделения углекислого газа из частиц карбоната. Если углекислый газ вступает во взаимодействие с примесью, снижается его парциальное давление у поверхности. При наличии твердофазового взаимодействия примеси с продуктом диссоциации карбоната изменяются также условия диффузии углекислого газа через слой прореагировавшего оксида.

На рис. 112 приведены зависимости, характеризующие кинетику выделения углекислого газа в изотермических условиях для смесей карбоната кальция с кремнеземом, витеритом и ферротитаном (соотношение массы карбоната и примеси в смеси равно 2). Наибольшим ускоряющим действием обладает примесь ферротитана. Наличие металлических порошков в смеси вызывает не только инициирование ранней диссоциации карбоната, но и ускорение ее.

А. А. Ерохиным [26, 50] при нагревании смесей карбонатов с ферромарганцем, содержащим различное количество углерода (доменный и электротермический ферромарганец), параллельно с окислением марганца изучалась реакция углерода. Углерод в доменном ферромарганце (содержащем 6,5 % С) окисляется при отношении $\xi = \%\ CaCO_3/\%\ FeMn \leqslant \leqslant 8$ и интенсивно восстанавливается в электротермическом ферромарганце (рис. 113). Авторы работы [26] объясняют эти изменения участием марганца в реакции углерода.



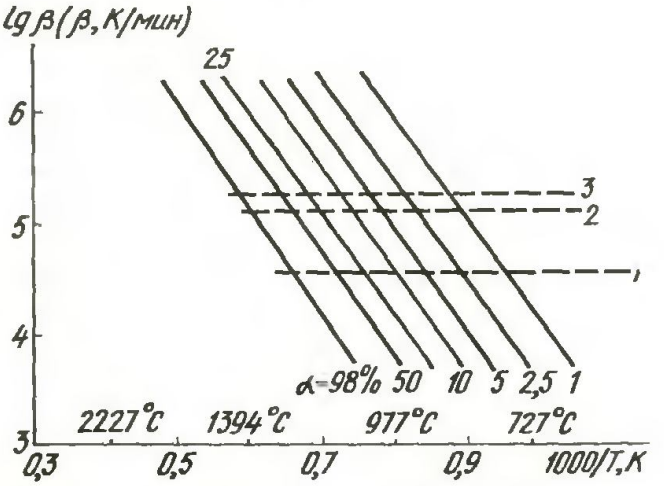
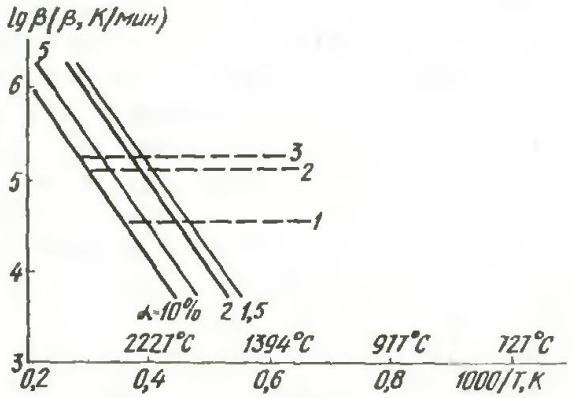


Рис. 114. Кинетическая диаграмма диссоциации карбоната кальция:
1 — скорость нагрева β = 3,29 · 10⁴ К/мин; *2* — 1,2 · 10⁵; *3* — 1,75 · 10⁵ [220].

Рис. 115. Кинетическая диаграмма диссоциации карбоната магния:
1 — скорость нагрева β = 3,29 · 10⁴ К/мин; *2* — 1,20 · 10⁵; *3* — 1,74 · 10⁵ [220].



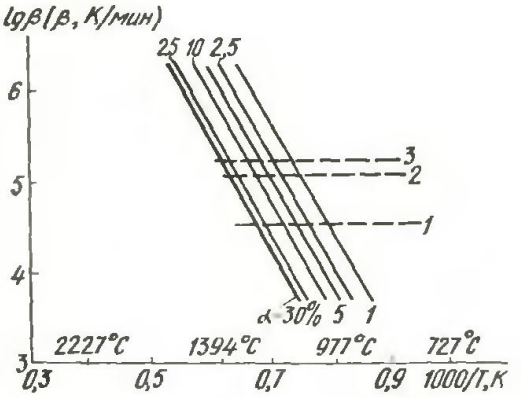


Рис. 116. Кинетическая диаграмма диссоциации карбоната натрия:
1 — скорость нагрева β = 3,29 · 10⁴ К/мин; *2* — 1,20 · 10⁵; *3* — 1,74 · 10⁵ [220].

Рис. 117. Кинетическая диаграмма диссоциации карбоната кальция в смеси с карбонатом натрия:
1 — скорость нагрева β = 3,29 · 10⁴ К/мин; *2* — 1,20 · 10⁵; *3* — 1,74 · 10⁵ [220].

В. Н. Шлепаков, С. А. Супрун и А. С. Котельчук [220] изучали параметры кинетики газообразования при разложении карбонатов и их смесей при скоростях нагрева, соответствующих реальным условиям сварки. В качестве объектов исследования использовались карбонаты кальция (мрамор), магния (магнезит), натрия (кальцинированная сода) и смеси карбоната кальция и натрия (в соотношении 1 : 0,73 по массе).

Термогравиметрические кривые диссоциации карбонатов кальция, магния, натрия и смеси двух карбонатов приведены на рис. 114—117.

Использование диаграмм позволяет сопоставить степень диссоциации различных карбонатов в условиях, моделирующих нагрев при сварке. Например, при температуре плавления железа степень диссоциации карбоната кальция составит около 25 %, магния — 98 %, соды — менее 1,5 %, смеси карбонатов кальция и натрия — более 30 %. Начало диссоциации карбоната кальция в смеси с карбонатом натрия смещается в область более низких температур при общем расширении температурного интервала газовыделения. Возрастание скорости нагрева приводит к увеличению диссоциации карбоната кальция в расплаве соды.

Вероятная смена механизма диссоциации не позволяет полностью переносить количественные данные на высокие скорости нагрева при качественном совпадении степени диссоциации реальным процессам. Экспериментальные данные показывают, что карбонат натрия до появления расплава практически не разлагается. С появлением расплава наблюдается интенсивное газовыделение. Малая энергия активации реакции разложения приводит к тому, что с ростом скорости нагрева температурный диапазон газовыделения смещается в область более высоких температур.

Диапазон наблюдаемых изменений позволяет сделать заключение, что подбором компонентов смеси в различных пропорциях можно регулировать газообразование как по температуре его начала, так и по величине температурного диапазона с учетом скоростей нагрева.

Окислительные процессы в смесях порошков, содержащих железо и ферросплавы. Известно, что на металлических поверхностях, свободно контактирующих с воздухом, всегда имеется тонкая пленка оксида. Толщина оксидных пленок, если они образуются при комнатной температуре, обычно не превышает 20—100 Å [7]. Для железа и ферросплавов, используемых в производстве сварочных материалов, характерно окисление с образованием компактного слоя окалины. После образования первичной оксидной пленки дальнейший процесс окисления включает две основные стадии: реакции на поверхностях раздела металл — оксид и оксид — кислород, а также перенос реагирующего материала через слой оксида [39]. В начальный момент скорость процесса определяется поверхностной реакцией, а затем процесс ограничивается диффузией ионов и электронов через слой образовавшегося оксида. При этом электроны перемещаются путем замещения электронных дырок, а ионы — путем замещения ионных вакансий [214]. Коэффициенты диффузии ионных кристаллов зависят от концентрации вакансий решетки или внедренных ионов, способных передвигаться, и от их подвижности [208].

Таким образом, при нагреве железа до температур, не превышающих 250 °С, получаются тонкие оксидные слои, в которых на переход иона через слой оксида влияют химический и электрический градиенты потенциалов. Скорость процесса окисления в этом случае можно описать уравнением [7]

$$dn/dt_1 = (N_0 + N_{диф} - n)\,\sigma_{эф} Z e^{-E/RT}, \quad (3.64)$$

где N_0 — начальное количество активных атомов металла на поверхности; $N_{диф}$ — количество активных атомов металлов, вышедших на поверхность в результате диффузионного процесса; n — число прореагировавших атомов металла; $\sigma_{эф}$ — эффективное сечение реакции атом металла — молекула газа; Z — число ударов молекул кислорода об 1 см^2 поверхности; t_1 — время окисления.

В множителе $e^{-E/RT}$, известном из уравнения Аррениуса, значение E представляет собой разность энергий активации активных и неактивных молекул. При более высоких температурах и толстых слоях оксида значение электрического поля, обусловленного хемосорбцией реагирующего газа. незначительно, потому что поверхностные реакции протекают с достаточной скоростью [208]. Незначительно также влияние пространственного заряда около поверхности, вызванного различной подвижностью ионов и электронных дефектов. Для этих условий Вагнер предложил уравнение

$$dn/dt_1 = \frac{q}{\Delta x}\left[C_{эк}\int_{a_м}^{a_к}\left(\frac{z_1}{|z_2|}D_1^* + D_2^*\right)d\ln a\right], \quad (3.65)$$

где q — поперечное сечение; Δx — толщина оксидного слоя в любой момент окисления; $C_{эк} = z_1C_1 = z_2C_2$ — концентрации металлических и неметаллических ионов; z_1 и z_2 — катионные и анионные валентности; $a_к$ и $a_м$ — термодинамические активности кислорода на границе оксид — кислород и оксид — металл; D_1^* и D_2^* — коэффициенты самодиффузии кислорода и металла.

Небольшая интенсивность диффузионных и кристаллохимических процессов при большой толщине оксидного слоя означает, что на границах слоев (напри-

мер, между металлом и низшим оксидом, между двумя разными оксидами при определенном парциальном давлении кислорода в газовой фазе) создаются условия, близкие к равновесным. Если известны равновесные условия в системе металл — кислород, можно судить о фазовом составе окалины и направлении окислительно-восстановительных процессов, т. е. качественно оценить равновесие с газовой фазой. Для количественной оценки необходим учет дефектности оксидов (отклонения от стехиометрического состава, дефекты решеток), а также влияния имеющихся примесей [214]. В композициях покрытий электродов практически не приходится иметь дело с чистыми металлическими порошками (без минеральной части).

А. А. Ерохин [50] обнаружил, что при нагреве смеси мрамор — ферромарганец до температуры плавления железа окисление марганца может достигать 50 %. Опыты проводились при нагреве смесей в трубчатой печи в токе аргона. Показано, что степень окисленности марганца линейно зависит от окислительной способности смеси (рис. 118):

$$\gamma^* = 0{,}55\,(1 - r)\,\xi', \qquad (3.66)$$

где γ^* — предельная степень окисленности при данных условиях; r — коэффициент пропорциональности; $\xi' = \%\ CaCO_3/\%\ Mn$ — окислительная способность смеси.

Зависимость (3.66) справедлива лишь для малых значений ξ', полное же окисление марганца не достигается при любых ее значениях (рис. 119), что объясняется снижением эффективной константы скорости реакции с ростом величины γ^* вследствие тормозящего действия слоя оксидов на поверхность частиц ферромарганца.

В реальных условиях сварки нагрев материалов покрытия, флюса или сердечника порошковой проволоки протекает в контакте с атмосферой воздуха. Степень окисления марганца кислородом воздуха, как отмечает Ю. Д. Брусницын [21], выше, чем при окислении углекислым газом, выделяющимся при диссоциации карбоната. В этих условиях процесс окисления железа или ферросплавов

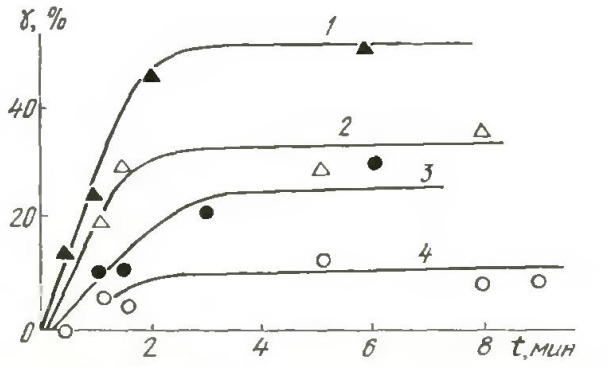


Рис. 118. Кинетика окисления марганца в смесях с мрамором (электротермический марганец): *1* — $T = 1273$ К, $\eta = 14$; *2* — $T = 1123$ К, $\eta = 14$; *3* — $T = 1273$ К, $\eta = 2{,}4$; *4* — $T = 1123$ К, $\eta = 2{,}4$ [50].

может начинаться раньше, чем диссоциация карбоната.

По данным [21], в смеси с мрамором и фтористым натрием окисление ферросилиция наблюдается при температуре около 600 °С, ферроалюминия — 570 °С. Комплексный термический анализ порошкообразных смесей, содержащих железо и ферросплавы, показал, что в условиях непрерывного нагрева окислительные процессы развиваются при температуре выше 400 °С.

Степень окисления железа и ферросплавов при диссоциации карбоната в смеси зависит от их окисленности к моменту диссоциации. Стойкость различных сплавов против окисления не находится в прямой зависимости от содержания легирующего [219] и его сродства к кислороду. Высокой стойкостью против окисления обладают ферросилиций и ферроалюминий, в которых легирующие повышают температурные границы устойчивости вюстита.

Скорость окисления ферросплавов и железного порошка, находящихся в смеси с карбонатами, при нагревании изменяется в соответствии с изменением парциального давления окислителя в газовой фазе.

На рис. 120 приведены кривые приращения массы железа и ферросплава при нагревании их смесей с мрамором (соотношение масс равно единице) на воздухе со скоростью 50 К/мин. Данные по приращению массы в период диссоциации карбоната (штрихпунктирной линией показан участок диссоциации карбоната)

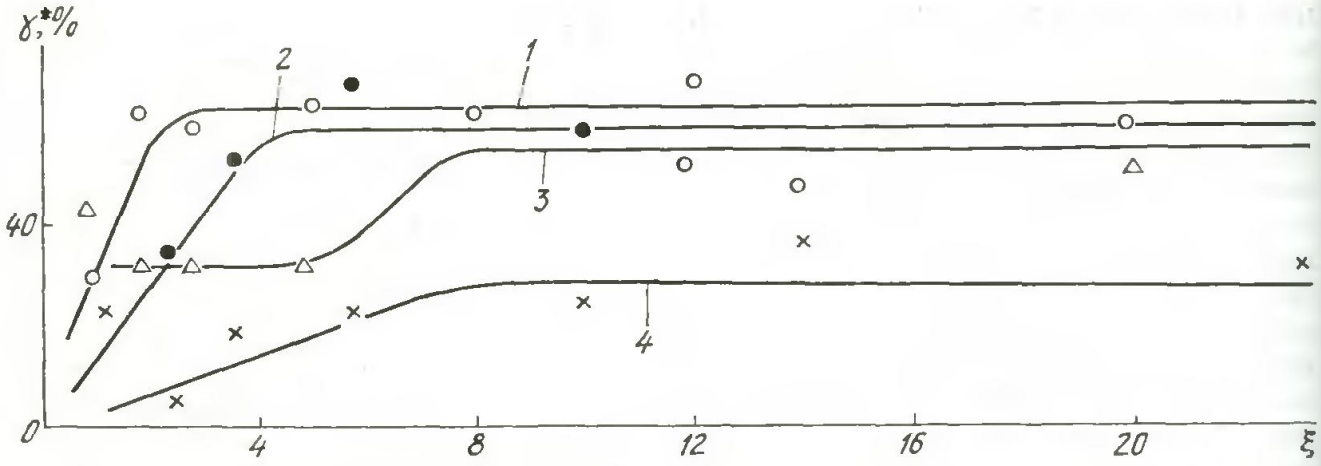


Рис. 119. *Зависимость предельной степени окисленности марганца от окислительной способности смеси в случае доменного (1, 3) и электротермического (2, 4) ферромарганца:*
1, 2 — мелкая фракция; 3, 4 — крупная [50].

получены при измерении разности между термогравиметрическими кривыми для чистого карбоната и его смеси с порошком металла. Для сравнения показано приращение массы в отсутствии карбоната.

На участке нагрева, предшествующем температурному диапазону диссоциации карбоната, скорости окисления ферросплавов без примесей и с примесями, содержащими карбонаты, весьма близки. Это говорит о том, что в таких смесях не происходит существенного нарушения

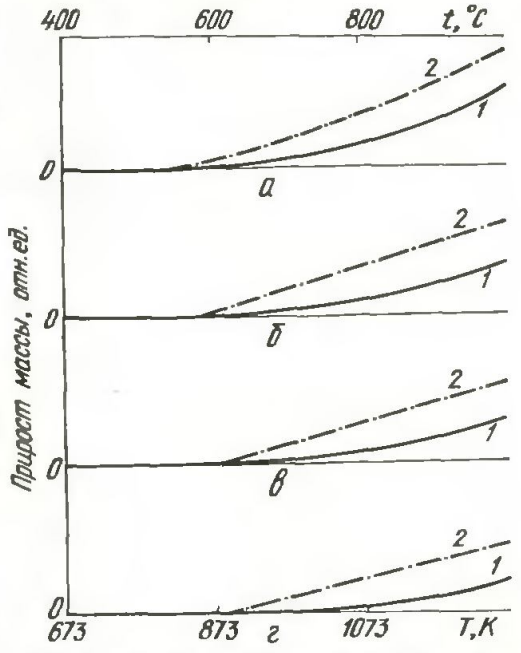


Рис. 120. Прирост массы при нагреве металлических порошков (*1*) и их смесей с карбонатом кальция (*2*):
а — Fe; б — FeTi; в — FeMn; г — FeSi.

оксидной пленки на частицах железа и ферросплавов вследствие взаимодействия с компонентами шихты до температур примерно 1000 °С. Можно изменить скорости окисления при более высоких температурах.

Наличие металлических порошков в смеси способствует повышению теплопроводности смеси и смещению температурного диапазона диссоциации карбонатов в область более низких температур. На рис. 121 приведены термограммы смесей, близких по химическому составу к электродным покрытиям основного вида (табл. 26). Термограммы исследованных смесей можно разделить на три участка. Первый участок характеризуется окислением железа и ферросплавов кислородом воздуха, что выражается в небольшом экзотермическом подъеме кривой ДТА и приростом массы — кривая ТГА. Второй участок соответствует одновременному протеканию процессов диссоциации карбоната и окисления железа и ферросплавов. На термогравиметрической кривой этот участок отмечен значительной потерей массы, вызванной диссоциацией карбоната. Третий — высокотемпературный — участок характеризуется дальнейшим приростом массы, связанным с продолжающимся процессом окисления железа и ферросплавов. На дифференциальной термической кривой фиксируются также термоэффекты, вызванные протекающими в этот период экзотермическими реакциями комплексообразования. Сравнение степени окисления при нагревании железа и ферросплавов без примесей и в смесях, содержащих карбонаты, показывает, что наличие кар-

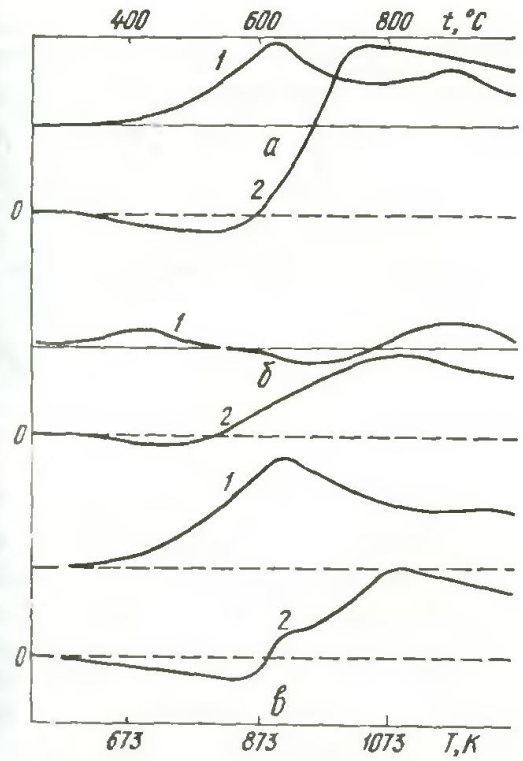


Рис. 121. Кривые термоанализа многокомпонентных смесей А-2 (*а*), А-3 (*б*) и А-6 (*в*):

1 — кривые ДТА; *2* — кривые ТГА

бонатов в смеси способствует большему окислению компонентов.

На рис. 122 представлены кривые термогравиметрического анализа смесей, содержащих в своем составе компоненты-окислители (мрамор, марганцевую руду, гематит) и легирующие компоненты (ферромарганец, ферросилиций, алюминиевый порошок, никель). Состав исследованных смесей приведен в табл. 27. Рассмотрим процессы, происходящие при их нагревании, несколько подробнее.

Таблица 26. **Состав смесей серии А, % (по массе)**

Составляющая смеси	А-2	А-3	А-6
Магнезит	—	8,6	9,0
Мрамор	14,7	—	—
Флюоритовый концентрат	17,3	17,0	12,0
Рутиловый концентрат	—	21,0	20,0
Шпат полевой	4,6	—	—
Сода кальцинированная	—	6,0	—
Ферромарганец	2,7	4,6	3,2
Ферросилиций	1,0	3,2	1,2
Ферротитан	10,0	—	15,0
Железный порошок	49,7	39,6	39,6

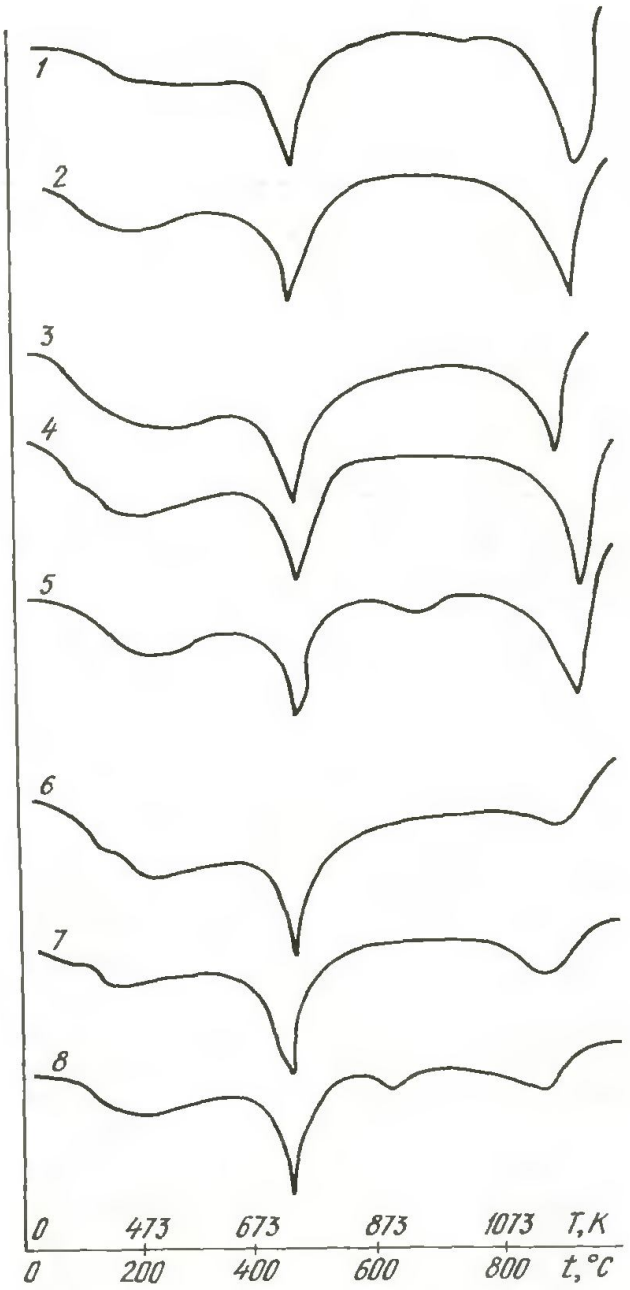


Рис. 122. Кривые термогравиметрического анализа опытных смесей (по данным Д. М. Кушнерева):

1—8 — номера смесей (см. табл. 27).

На всех кривых ДТА (см. рис. 122) наблюдается широкий эндотермический эффект при нагревании смесей до 160—180 °С, соответствующий удалению адсорбционной влаги. Для всех смесей, содержащих магнезитовый металлургический порошок, характерен эндотермический эффект с пиком при 440—460 °С в результате дегидратации. При повышении температуры смесей выше 600 °С кривые ДТА фиксируют различные для каждой смеси эндотермические эффекты

Таблица 27. **Состав смесей, % (по массе)**

Составляющая смеси	Номер смеси									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Магнезитовый металлический порошок	90	85	85	85	85	95	95	95	—	—
Мрамор	10	10	10	10	10	—	—	—	50	—
Гематит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50
Ферромарганец	—	—	5	—	—	5	—	—	50	50
Ферросилиций ФС-75	—	—	—	5	—	—	5	—	—	—
Алюминиевый порошок	—	—	—	—	5	—	—	5	—	—
Никелевый порошок	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—

диссоциации соединений и экзотермические эффекты окисления легирующих компонентов.

В смеси 1 (90 % магнезитового порошка и 10 % мрамора) диссоциация мрамора начинается при 720 °С, максимум этой реакции при 880 °С. В смеси 2 (85 % магнезитового порошка, 10 % мрамора и 5 % никеля) диссоциация мрамора начинается при более низкой температуре (около 680 °С). Кривая фиксирует незначительное окисление никеля при нагреве смеси до температуры, превышающей 900 °С. При замене никеля в этой смеси ферромарганцем (смесь 3) эндотермический эффект диссоциации мрамора выражен менее интенсивно (см. рис. 122), так как на него накладывается экзотермический эффект окисления ферромарганца. Теплота, выделяемая при окислении, способствует диссоциации мрамора, в результате чего максимум этой реакции несколько сдвинут влево — в сторону более низких температур.

Кривая ДТА смеси 4, в состав которой входит ферросилиций, в интервале температур 20—850 °С напоминает кривую ДТА для смеси 2, содержащей никель. При увеличении температуры смеси выше 900 °С наблюдается интенсивное окисление ферросилиция. Отсутствие заметного окисления последнего при более низких температурах объясняется тем, что ферросилиций до использования длительное время хранился в размолотом виде и подвергался естественной пассивации.

Кривая ДТА смеси 5 (см. рис. 122) не фиксирует заметного экзотермического эффекта окисления алюминия вплоть до его расплавления. Эндотермический эффект расплавления алюминия наблюдается в температурном интервале 620—680 °С. Некоторое окисление алюминия, видимо, происходит при 800—830 °С, что видно по незначительному подъему кривой ДТА в этом интервале температур и по расширению эндотермического эффекта диссоциации мрамора. Однако наиболее интенсивно окисление алюминиевого порошка в данной смеси происходит при температуре свыше 900 °С, что соответствует резкому подъему кривой ДТА.

Рассмотрение кривых ДТА двухкомпонентных смесей 6, 7 и 8, состоящих из магнезитового металлургического порошка (95 %) и добавок (по 5 %) легирующих компонентов (соответственно ферромарганца, ферросилиция и алюминиевого порошка), показывает, что несмотря на отсутствие в этих смесях мрамора наблюдается эндотермический эффект в интервале температур 800—900 °С. Этот эффект, значительно меньший, чем в смесях с мрамором, свидетельствует о наличии в составе магнезитового металлургического порошка некоторого количества карбонатов.

В смеси 6, содержащей ферромарганец, наблюдается некоторое окисление последнего, начиная с температуры около 700 °С. Окисление становится интенсивным при нагреве смеси до температуры выше 850 °С. Ферросилиций в смеси с магнезитовым металлургическим порошком (смесь 7) начинает интенсивно окисляться только при нагреве выше 850 °С. При нагревании алюминиевого порошка в смеси с магнезитовым металлургиче-

ским порошком (смесь 8) при 620—680 °С происходит плавление алюминиевого порошка, а его интенсивное окисление наблюдается при температуре около 900 °С.

Интенсивность и температурный интервал окисления ферросплавов в смеси с компонентами-окислителями должны

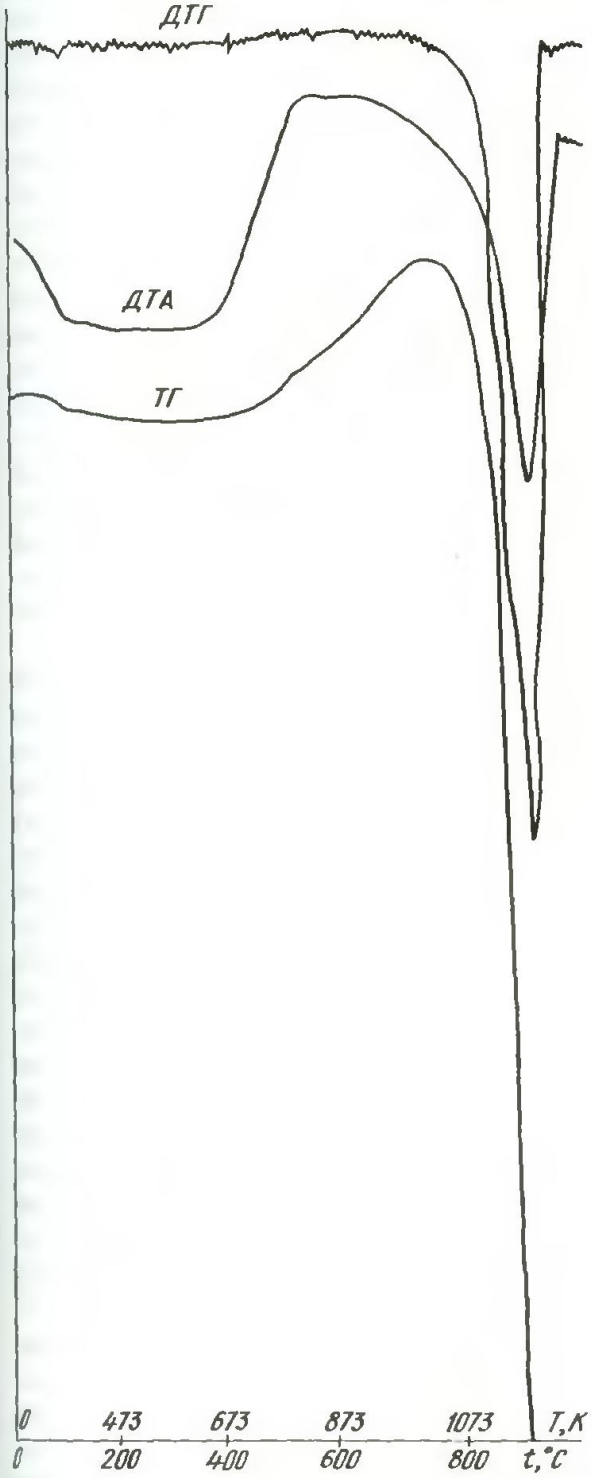


Рис. 123. Дериватограмма смеси из 50 % мрамора и 50 % ферромарганца (смесь № 9 в табл. 27) (по данным Д. М. Кушнерева).

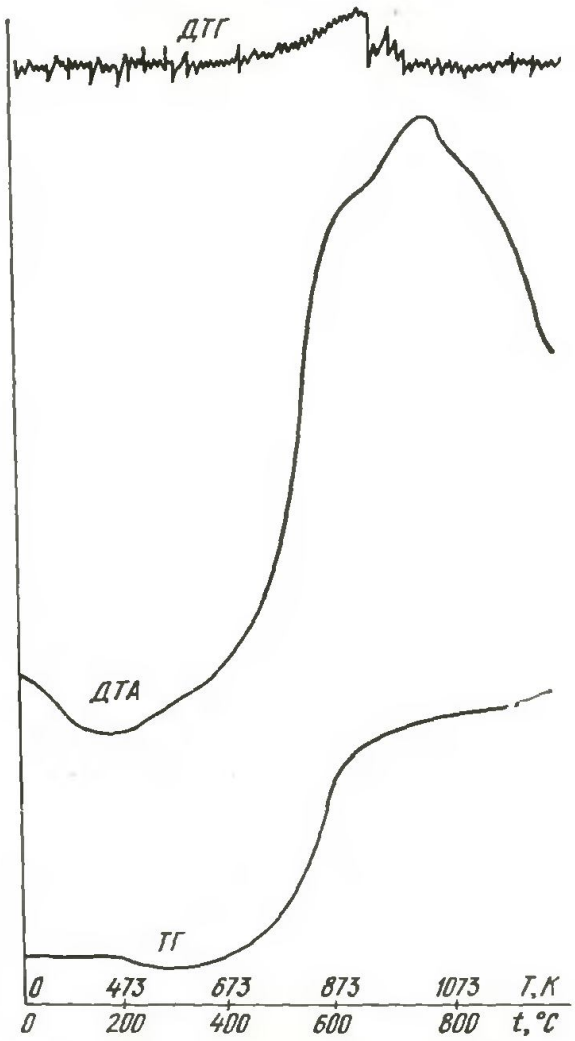


Рис. 124. Дериватограмма смеси из 50 % гематита и 50 % ферромарганца (смесь № 10 в табл. 27) (по данным Д. М. Кушнерева)

зависеть от концентрационного фактора. Выше рассматривались дериватограммы смесей, в которых количество легирующих компонентов, как и компонентов-окислителей, соответствовало реальным содержаниям их в керамических флюсах и электродных покрытиях. Для сравнения проводился термографический анализ смесей с более высокими концентрациями реагирующих компонентов.

На рис. 123 и 124 приведены дериватограммы двух смесей 9 и 10, первая из которых состоит из 50 % ферромарганца и 50 % мрамора, вторая — 50 % ферромарганца и 50 % гематита. Как видно, в первом случае (смесь 9) окисление ферромарганца начинается уже при 440 °С и происходит значительно более интенсивно, чем в смеси, содержащей 5 % ферромарганца и 10 % мрамора. Окисление ферромарганца в смеси 10 (по 50 %

Таблица 28. **Результаты рентгеноструктурного анализа смеси порошков с жидким натриевым стеклом**

Номер смеси	Составляющие смеси	Температура нагрева, °С	Обнаруженные фазы
1 *	MgO; Al_2O_3; SiO_2; Zr_2SiO_4; $CaSiO_3$; CaF_2; FeMn; FeSi; $Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$	400	MgO; Al_2O_3; SiO_2; $ZrSiO_4$; $CaSiO_3$; $FeMn_1$; FeSi; Na_2SiO_3
		600	MgO; Al_2O_3; SiO_2; $ZrSiO_4$; $CaSiO_3$; $FeMn_1$; FeSi; Na_2SiO_3; NaF
		800	MgO; Al_2O_3; SiO_2; $ZrSiO_4$; Na_2SiO_3; $Na_2Ca_2(SiO_3)_3$; FeSi; $2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$; NaF; $FeMn_1$
2	$MgCO_3$; CaF_2; SiO_2	600	MgO; SiO_2; CaF_2
		900	$CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$; SiO_2; CaF_2; MgO
		1100	MgO; CaF_2
3	$CaCO_3$; CaF_2; Al_2O_3; Na_2CO_3	600	CaF_2; Al_2O_3; Na_2CO_3; $CaCO_3$
		900	$5CaO \cdot 3Al_2O_3$; NaF; CaF_2; Al_2O_3
		1100	Al_2O_3; $NaCa_4Al_3O_9$
4 *	CaF_2; $Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$	700	CaF_2
		800	CaF_2; $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF_2$
5 *	MgO; $Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot mH_2O$	500	MgO
		600	MgO; Mg_2SiO_4; $CaMgSiO_4$
		700	MgO; Mg_2SiO_4; $CaMgO_4$

* По данным Д. М. Кушнерева.

гематита и ферромарганца) начинается при еще более низкой температуре (примерно 340 °С) и наиболее интенсивно по сравнению со всеми рассмотренными смесями.

Образование комплексных соединений. Реакции с участием фторидов. В многокомпонентных смесях твердых веществ процессы взаимодействия обычно протекают ступенчато, при этом последовательность образования промежуточных соединений не зависит от соотношения между исходными реагентами.

Термодинамический анализ твердофазовых реакций показывает, что их направление определяется преимущественно изменением теплосодержания. Этот вывод положен в основу определения реакционной способности твердых веществ при термоанализе. Реакции между твердыми веществами характеризуются экзотермическим эффектом [201].

На протекание твердофазовых реакций существенное влияние оказывают температура, давление, гранулометрический состав смеси, окружающая среда, наличие ускорителей, определяющих условия твердофазового взаимодействия.

Согласно существующим представлениям, твердофазовое взаимодействие становится наиболее вероятным при температурах, когда нарушается кристаллическая решетка веществ. В минеральных смесях, содержащих карбонаты, процессы образования двойных соединений получают наибольшее развитие после завершения диссоциации карбоната [199].

В табл. 28 представлены результаты рентгеноструктурного анализа смеси порошков с жидким натриевым стеклом (смесь 1) при различной температуре ее нагрева (продолжительность нагрева 1 ч). Как следует из приведенных данных, при нагреве и изотермической выдержке в течение 1 ч этой смеси зафиксированы комплексные соединения $Na_2Ca_2(SiO_3)_3$ и $2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$.

На протекание процессов комплексообразования значительно влияет удельная поверхность шихты. При нагревании смесей тонкоизмельченных порошков скорость комплексообразования возрастает. На рис. 125 приведены зависимости скорости взаимодействия оксида кальция

с кварцем от температуры, времени выдержки, а также удельной поверхности шихты для смеси порошков кварца и мрамора из расчета получения двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$.

Появление расплава в смеси резко ускоряет процессы комплексообразования. При формировании шлака происходит постепенное растворение тугоплавких компонентов смеси в эвтектических расплавах. В табл. 28 приведены результаты рентгеноструктурного анализа двух смесей порошков (2 и 3), нагреваемых до температур образования шлакового расплава. При температуре выше 900 °С для этих смесей в процессе рентгеноструктурного анализа четко фиксируются относительно тугоплавкие соединения, не успевшие раствориться в расплаве и сохранившие кристаллическую структуру.

Наличие в составе смеси с фтористым кальцием силиката натрия приводит к развитию их взаимодействия с образованием фтористого натрия по реакции

$$CaF_2 + Na_2O \cdot nSiO_2 = CaO \cdot nSiO_2 + 2NaF. \qquad (3.67)$$

Эта реакция с заметной скоростью протекает уже при 600—650 °С (см. табл. 28, смесь 1). При нагревании простейшей смеси флюоритового концентрата с жидким стеклом до 800 °С анализ дифрактограмм, выполненный Д. М. Кушнеревым, показал присутствие куспидина ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF_2$), образование которого может быть вызвано наличием примесей карбоната кальция во флюоритовом концентрате (смесь 4 в табл. 28). Данные рентгеноструктурного анализа, полученные при нагреве смеси магнезитового металлургического порошка с жидким стеклом до 600 °С, показывают наличие в ней форстерита (Mg_2SiO_4) и монтичеллита ($CaMgSiO_4$) (смесь 5 в табл. 28). На дифрактограмме этой же смеси, нагретой до 700 °С, пики образования комплексов выражены более явно, что говорит о росте концентрации этих веществ с повышением температуры прокалки.

Тетрафторид кремния в сварочных материалах может образоваться при диссоциации кремнефторидов щелочных и щелочноземельных металлов [184, 206].

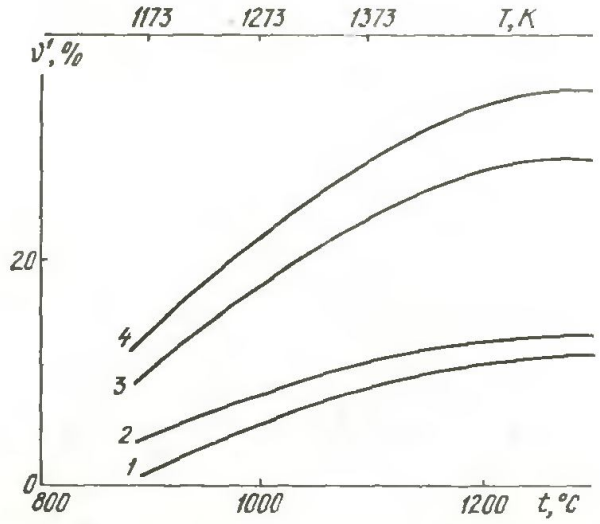


Рис. 125. Зависимость скорости взаимодействия оксида кальция с кремнеземом от температуры, времени выдержки и удельной поверхности смеси (по данным М. М. Сычева и др.):

1, 3 — время выдержки 10 мин; *2, 4* — 1 ч; удельная поверхность:
1, 2 — 188 см²/г; *3, 4* — 848 см²/г.

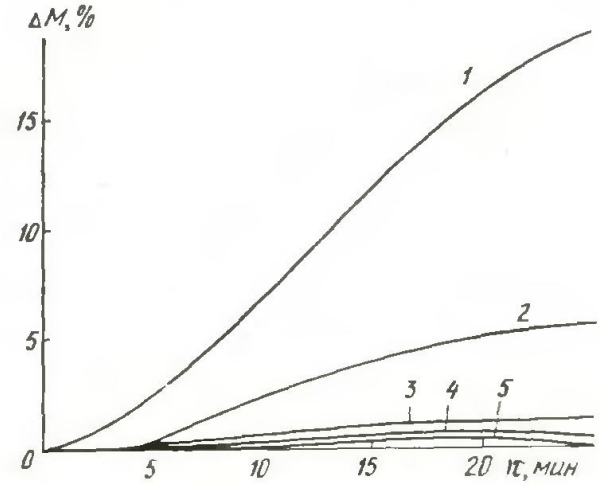


Рис. 126. Потери массы при изотермической выдержке флюорита (*5*) и его смесей с кремнеземом (*1, 2, 4*) и диоксидом титана (*3*):

1, 5 — 1373 К; *2, 3* — 1323 К; *4* — 1273 К

Кремнефтористый натрий, например, разлагается при температуре ниже 500 °С с образованием тетрафторида кремния:

$$Na_2SiF_6 = 2NaF + SiF_4. \qquad (3.68)$$

Флюорит может при высоких температурах взаимодействовать также с диоксидом титана [112]. Комплексный термический анализ порошковых смесей, содержащих флюорит, проведенный С. А. Супруном, показал, что при нагреве до 1100 °С со скоростью порядка 10 °С/мин взаимодействия флюорита с примесями кремнезема и диоксидом титана не

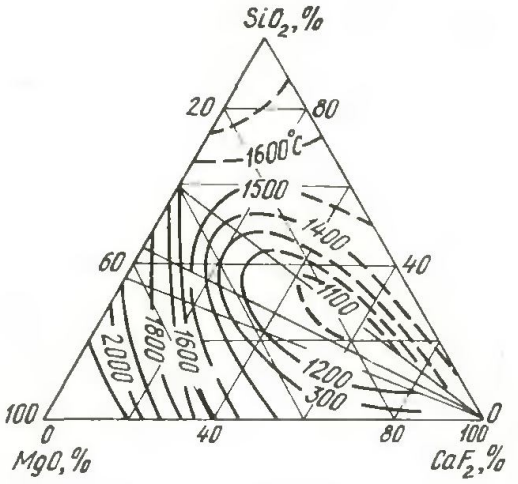


Рис. 127. Диаграмма плавкости системы MgO — CaF_2 — SiO_2.

происходит. Изотермическая выдержка смесей флюорита с кремнеземом и диоксидом титана (соотношение масс CaF_2 : SiO_2 и CaF_2 : TiO_2 равняется единице) при температуре выше 1000 °С вызывает заметную потерю массы (рис. 126). Эти данные свидетельствуют о том, что существенное развитие рассматриваемые реакции флюорита в реальных условиях сварки получат лишь в высокотемпературной зоне, т. е. практически в расплавленном шлаке. Флюорит, снижая температуру образующихся расплавов, является ускорителем многих реакций образования силикатов и титанатов [23, 12]

Возможность образования шлакового расплава из смеси порошков зависит от степени приближения системы к области наиболее легкоплавких составов и предварительно оценивается по фазовым диаграммам. На рис. 127 приведена диаграмма плавкости системы MgO — CaF_2 — SiO_2. Сопоставление данных, приведенных в табл. 28 и на рис. 127, свидетельствует о возможности образования в системе жидкой фазы.

Смеси порошкообразных материалов на базе флюорита представляют интерес в связи с образованием расплавов при температурах ниже 1200 °С и выделением летучих фторидов. Флюорит — основной источник фора в электродных покрытиях, флюсах и сердечниках порошковых проволок.

Флюорит при нагревании взаимодействует с водяным паром [118, 178]. Твердый фтористый кальций практически полно-

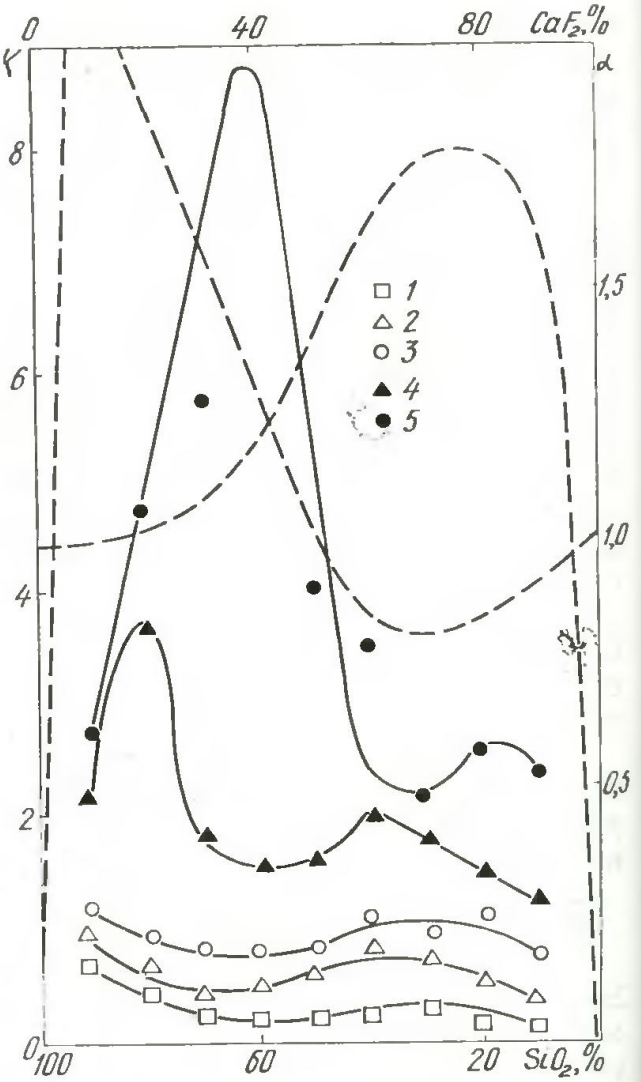


Рис. 128. Зависимость константы скорости реакции и активности компонентов в системе CaF_2 — SiO_2 от ее состава:

1 — 1023 К; *2* — 1123 К; *3* — 1273 К; *4* — 1373 К; *5* — 1473 К [81]

стью разлагается перегретым паром [119], образуя летучее соединение — фтористый водород. Соединение HF образуется также при нагревании фторсодержащих веществ в присутствии водяного пара [216]. Фтористый водород обнаруживается в масс-спектре при нагреве в вакууме фторидных шлаков [224, 216].

Скорость реакции флюорита с водяным паром возрастает при наличии диоксида кремния. Взаимодействие может происходить, например, по схеме

$$2CaF_2 + 2H_2O\ (пар) + SiO_2 = \\ = 2CaO \cdot SiO_2 + 4HF\ (газ). \qquad (3.69)$$

Протекание первоначально реакции флюорита с кремнеземом с последующим взаимодействием образовавшегося тетра-

фторида кремния с водяным паром менее вероятно [118, 117]. Заметное выделение тетрафторида кремния из сухой смеси фтористого кальция с кварцем, согласно данным работы [118], наблюдается при температуре выше 1100 °С. При расплавлении такой смеси обнаруживается расслоение на две жидкости, что говорит об ограниченной растворимости кремнезема в расплаве флюорита [212]. При нагревании и плавлении флюсов, содержащих флюорит и кремнезем, образование тетрафторида кремния замечено при более низких температурах [142, 178].

Процессы, происходящие при нагреве смеси порошков CaF_2 и SiO_2 в диапазоне температур 800—1900 °С, изучал В. Г. Кузьменко [81]. Установлено, что интенсивность взаимодействия CaF_2 и SiO_2 в интервале 800—1200 °С сравнительно невелика, увеличивается с повышением температуры и сложным образом зависит от состава смеси (рис. 128). По данным [81], для смеси, содержащей 95 % CaF_2 и 5 % SiO_2, в диапазоне температур 1450—1900 °С наблюдается большая потеря массы в первый период реакции и последующее ее снижение (рис. 129), хотя содержание SiO_2 в шлаке при этом довольно высоко. По мнению автора работы [81], это вызвано тем, что в результате взаимодействия CaF_2 с SiO_2, кроме SiF_4, может образовываться также CaF_2, способная связывать SiO_2 в комплексы типа силикатов кальция. Последнее приводит к снижению активности SiO_2 [140] и замедлению и даже полному прекращению реакции

С увеличением температуры отношение CaO/SiO_2 в шлаке после прекращения реакции смещается в область образования силикатов с повышенным содержанием CaO (рис. 130). При введении в основную смесь добавок типа CaO и Al_2O_3 скорость реакции взаимодействия между CaF_2 и SiO_2 снижается, что подтверждается уменьшением степени использования исходных реагентов (рис. 131). При этом при добавлении Al_2O_3, по мнению автора работы [81], скорость реакции снижается вследствие образования дополнительного количества CaO в результате протекания обменной реакции между CaF_2 и Al_2O_3, а также

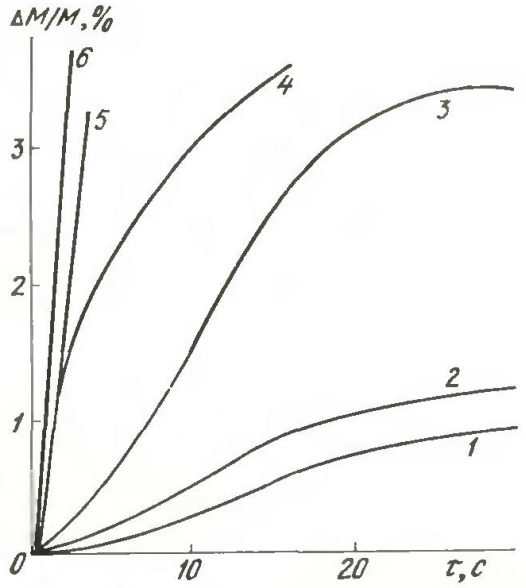


Рис. 129. Кинетика реакции взаимодействия между CaF (95 %)) и SiO_2 (5 %) в пределах 1723—2173 К:

1 — 1723 К; *2* — 1768 К; *3* — 1873 К; *4* — 1973 К; *5* — 2073 К; *6* — 2173 К [81].

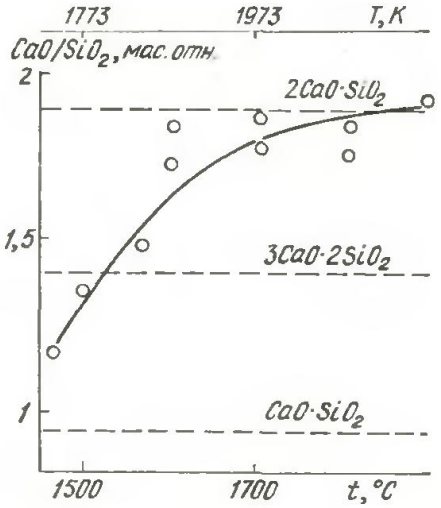


Рис. 130. Состав образующихся продуктов реакции взаимодействия CaF_2 (95 %) и SiO_2 (5 %) при нагреве в пределах 1723—2173 К [81].

связывания SiO_2 в комплексы типа алюмосиликатов [17].

На графике, характеризующем зависимость скорости реакции между CaF_2 и SiO_2 от температуры нагрева, по данным [81], наблюдается излом в точке, соответствующий температуре плавления исследуемого шлака и вызванный изменением условий взаимодействия компонентов (рис. 132).

Данные о степени взаимодействия смесей порошков CaF_2 с SiO_2 и TiO_2 в зависимости от температуры нагрева и состава смеси (в мольных долях) приведены

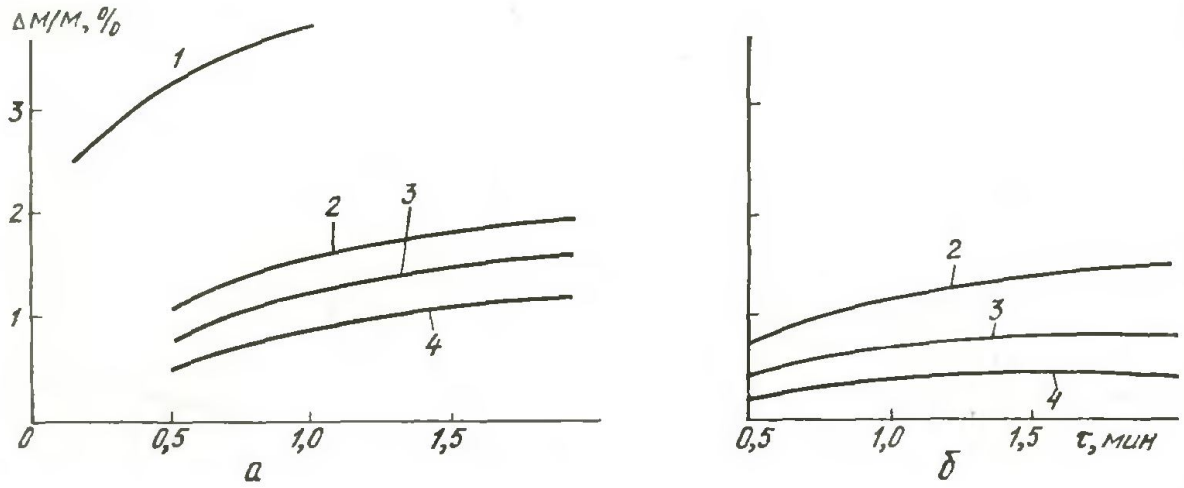


Рис. 131. Влияние добавок CaO (*а*) и Al_2O_3 (*б*) на протекание реакции взаимодействия CaF_2 (95 %) и SiO_2 (5 %) при 1873 К:

1 — исходный состав; *2* — добавка 3 %; *3* — добавка 5 %; *4* — добавка 7 % [81].

ниже (скорость пропорционального нагрева 7 °С/мин):

T, °С	800	900	1000	1100	1150
$2CaF_2 - 3SiO_2$	0,01	0,02	0,06	0,12	0,15 *
$2CaF_2 - 3TiO_2$	0,02	0,007	0,02	0,05	0,08
$4CaF_2 - 3SiO_2 - 3TiO_2$	0,06	0,01	0,03	0,08	0,11

* При $T = 1130$ °С

Величина α характеризует интенсивность выделения тетрафторидов кремния и титана. Так, для взаимодействия фтористого кальция с кремнеземом

$$\alpha = \Delta m/m, \qquad (3.70)$$

где Δm — масса фтористого кальция,

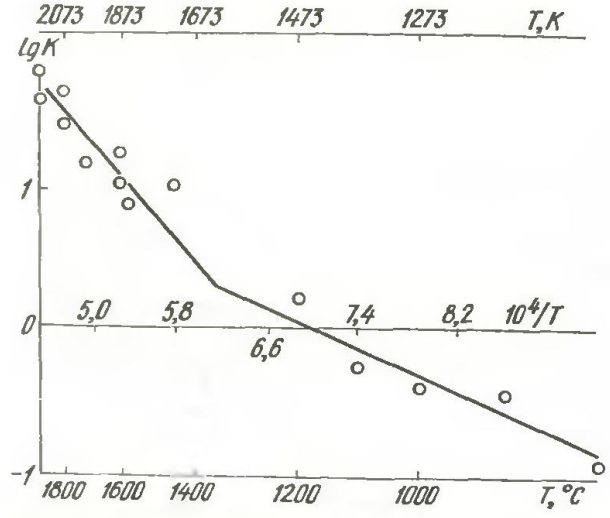


Рис. 132. Зависимость скорости реакции между CaF_2 (95 %) и SiO_2 (5 %) от температуры (1073—2173 К) [81].

вступившая во взаимодействие и приводящая к образованию SiF_4; m — исходная масса фтористого кальция в смеси.

Так как потеря массы смеси при высокотемпературном нагреве в соответствии с реакцией взаимодействия CaF_2 и SiO_2 равна

$$\Delta M = \Delta m \frac{104}{2,78}, \qquad (3.71)$$

степень взаимодействия фтористого кальция и кремнезема

$$\alpha = \frac{\Delta M}{m} \frac{2,78}{104}. \qquad (3.72)$$

При принятых условиях эксперимента взаимодействие в смесях CaF_2 с SiO_2 и TiO_2 начинается при температуре выше 800 °С и повышается с ростом температуры (см. выше). При этом большее выделение фтористых газов зарегистрировано при нагреве смеси CaF_2 и SiO_2; выделение тетрафторида титана из смеси CaF_2 и TiO_2 идет в меньшей степени.

При снижении концентрации CaF_2 в смеси с кремнеземом резкое уменьшение выделений тетрафторида кремния не достигается; степень взаимодействия фтористого кальция увеличивается (нагрев 15 мин, $T = 1200$ °С ± 30 °С):

Массовое содержание CaF_2, %	34,2	45,4	52,3	56,5	61,0	66,0
α	0,4	0,32	0,26	0,23	0,2	0,14

Объяснение полученных результатов может быть следующим. Согласно принятым представлениям, процесс твердофазового взаимодействия определяется числом мест контакта разнородных час-

тиц и состоянием реакционной поверхности в зоне контакта.

Принимаем в первом приближении, что вероятность δ контактирования частиц одинакового рода в бинарной смеси порошков равна доле частиц данного рода в смеси:

$$\delta = K = n/D, \qquad (3.73)$$

где n — число частиц данного рода в смеси; D — общее число частиц смеси.

Наиболее часто реализуемое число контактов частиц разного рода в бинарной смеси

$$a = A(1 - \delta) = A(1 - K), \qquad (3.74)$$

где A — наиболее часто реализуемое число контактов частицы с другими частицами порошка, $A = 13$.

Из выражения (3.74) следует, что при прочих равных условиях относительное число мест контакта частиц CaF_2 с SiO_2 будет возрастать при снижении концентрации фтористого кальция в смеси, поэтому для резкого снижения выделений SiF_4 нужно уменьшать концентрацию CaF_2 ниже уровня, обеспечивающего необходимое металлургическое воздействие.

Другим путем регулирования выделений SiF_4 является изменение активной концентрации SiO_2. Так, снижение последней возможно при взаимодействии кремнезема с оксидами щелочных или щелочноземельных элементов с образованием силикатов. Например, добавление оксидов магния или кальция к смеси CaF_2 с SiO_2 и TiO_2 приводит к заметному снижению выделения тетрафторида кремния. Это вызвано уменьшением активной концентрации SiO_2 при энергичном образовании силикатов и титанатов, наличие которых в продуктах взаимодействия авторы обнаружили термическим и рентгеноструктурным методами анализа. Ниже приведены значения α для смеси фтористого кальция с кремнеземом:

T, °C	900	950	1000	1050	1100	1150
$CaF_2 - SiO_2 - 2CaO$	—	0,002	0.01	0,012	0,015	0,018
$CaF_2 - SiO_2 - TiO_2 - 2CaO$	0,003	0,004	0,005	0,006	0,006	0,008
$CaF_2 - SiO_2 - 2MgO$	—	—	0,003	0,009	0,028	—
$CaF_2 - SiO_2 - TiO_2 - 3MgO$	—	0,009	0,015	0,027	0,045	—

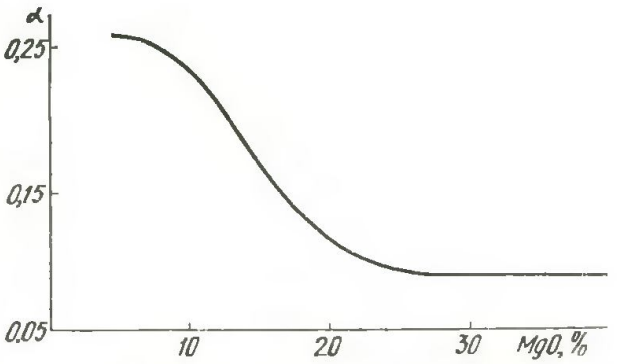


Рис. 133. Степень взаимодействия фтористого кальция с кремнеземом в зависимости от массового содержания MgO в смеси $CaF_2 - SiO_2 - MgO$ (продолжительность нагрева 15 мин, T = = 1530 K ± 20 K) (по данным С. А. Супруна).

В процессе взаимодействия состав и количество продуктов, образующихся в зоне раздела реагирующих фаз, изменяются. Скорость выделения фтористых газов из смесей различного состава также связана с характеристиками зоны раздела.

С. А. Супрун изучал кинетику выделения SiF_4 при нагреве с высокой скоростью различных композиций порошков и установил, что для принятых условий степень взаимодействия CaF_2 с SiO_2 может быть выражена уравнением

$$\alpha = 1 - a_0 e^{-\beta t}, \qquad (3.75)$$

где a_0 и β — постоянные, определяемые по экспериментальным данным.

На рис. 133 приведены результаты исследования влияния оксида магния на уровень выделения фтористого кремния, проведенные при нагреве смесей порошков CaF_2, SiO_2 и переменного количества MgO. Как видно, значительное снижение выделения SiF_4 достигается при увеличении массы MgO в смеси до величины порядка 20 %; в дальнейшем повышение содержания оксида магния не оказывает существенного влияния на этот процесс.

Результаты исследования процессов, протекающих в смесях порошков при нагревании, позволяют заключить следующее. Введение в смесь металлических порошков смещает температурный диапазон диссоциации карбонатов в область более низких температур. Диссоциация карбоната способствует интенсификации окисления железного порошка и ферросплавов. Использование смесей карбона-

Таблица 29. **Теплофизические данные для некоторых металлов [176]**

Наименование показателей	K	Na	Zn	Mg	Mn	Al	Cu	Ni	Cr	Fe	Si	Ti	V
Температура плавления, °С	63,5	97,8	419,5	651	1245	660	1083	1455	1890	1539	1420	1668	1900
Гемпература кипения, °С	776	883	906,2	1107	2080	2500	2543	2900	2680	2870	3300	3330	3400
Теплота испарения, кДж/моль	79,2	83,3	115,3	131,8	227	293	302	369,9	338	350	355,6	410	444,8
Температура, при которой давление насыщенного пара составляет 0.013 МПа, К	589	704	738	892	1745		2312	1850	2220	2396	2239	2833	2955

тов способствует более равномерному выделению углекислого газа в широком диапазоне температур при диссоциации карбонатов, чем введение отдельных карбонатов. Приближение состава шлакообразующей части сердечника к составу эвтектических смесей способствует быстрому образованию расплава. Шлакообразованию предшествуют и сопровождают его реакции образования комплексных соединений.

Рассмотренные процессы в значительной мере определяют формирование газовой и шлаковой защиты металла в реакционной зоне при сварке. Они начинаются при нагреве и продолжают развиваться при плавлении сварочных материалов.

4. Испарение электродного материала и образование сварочного аэрозоля

Процессы дуговой сварки плавлением, в том числе ручной дуговой сварки покрытыми электродами, сопровождаются высокотемпературным нагревом и испарением некоторой части основного и электродного материала. В результате рассеяния образующейся газопаровой смеси из высокотемпературной зоны дугового разряда в окружающую среду с более низкой температурой происходит конденсация паровой фазы с образованием мельчайших твердых частиц, взвешенных в потоке газов. Эта смесь газов и мельчайших твердых частиц называется сварочным аэрозолем. Рассматривая состав аэрозоля, выделяют твердую составляющую сварочного аэрозоля (ТССА) и газообразную составляющую сварочного аэрозоля (ГССА).

Установлено, что при сварке покрытыми электродами испаряется 1—3 % электродного материала [263]. Интенсивность испарения металлического и шлакового расплавов, образующихся при плавлении электрода и основного металла, зависит от режимов сварки, техники сварки, пространственного положения сварки, составов электродного покрытия, основного и присадочного металлов. Эти же факторы оказывают большое влияние и на состав сварочного аэрозоля.

Скорость испарения однофазного расплава определяется площадью его свободной поверхности и давлением насыщенного пара. Зависимость давления насыщенного пара чистого вещества от температуры выражается известным уравнением Клаузиуса — Клапейрона

$$\lg p = -\Delta H/4{,}575T + \text{const}, \qquad (3.76)$$

где p — давление пара над жидкостью; ΔH — теплота испарения, принимаемая упрощенно постоянной.

Чем меньше теплота испарения вещества и больше температура его нагрева, тем интенсивнее идет процесс испарения. Значения некоторых физических величин, определяющих интенсивность процесса испарения для ряда элементов, входящих в конструкционные сплавы и электродные покрытия, приведены в табл. 29.

При сварке, как правило, расплавляются не чистые металлы, а сплавы сложно-

го состава. В этих случаях пар представляет собой смесь паров компонентов сплава, причем элементы с более низкой теплотой испарения будут составлять относительно большую часть (давление) паров. Избирательность является важнейшей особенностью испарения многокомпонентных систем. Например, из железомарганцевых расплавов испаряется при нагреве прежде всего марганец [102, 205], причем этот процесс развивается тем интенсивнее, чем выше содержание марганца в расплаве. Ниже даны примеры избирательного испарения элементов с более низкими значениями температуры кипения и теплоты испарения, чем железо (химический состав в % по массе).

	Fe	Mn
Электрод	98	1,13
Продукты конденсации пара	45	6,2

При сварке плавящимся электродом металл проходит последовательно стадии капли и ванны. Для стадии капли характерны высокая удельная поверхность, на порядок превышающая удельную поверхность сварочной ванны [49], и более высокий уровень перегрева. В момент отрыва от торца электрода средняя температура капель, как отмечалось выше, может достигать 2500 К, причем в зонах активных пятен она может достигать значений, равных температуре кипения [97]. В случае сварки покрытыми электродами помимо металлического расплава указанные стадии проходит и шлаковая фаза. Поскольку на стадии капли двухфазная система металлический расплав — шлак характеризуется более высокими значениями удельной поверхности и температуры, то можно полагать, что здесь условия испарения более благоприятны, чем на стадии ванны. Наличие большого градиента температур в зоне дугового разряда создает благоприятные условия для конвективного массопереноса продуктов испарения в зону более низких температур, где происходит конденсация паровой фазы и окисление продуктов конденсации.

Исследования механизма образования сварочного аэрозоля, выполненные М. Кобаяши с соавторами [269], показали, что

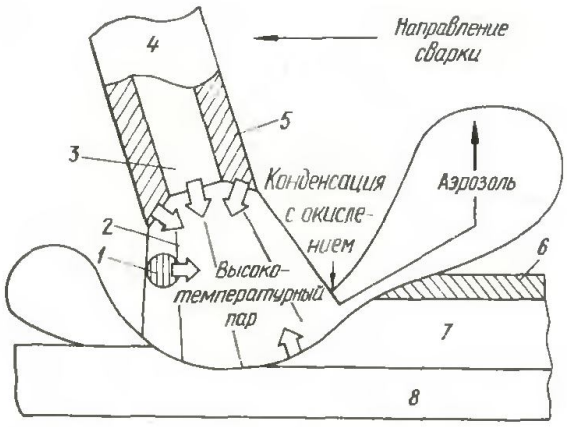


Рис. 134. Механизм образования сварочного аэрозоля:

1 — капля; *2* — дуга; *3* — электродный стержень; *4* — электрод; *5* — покрытие; *6* — шлак; *7* — металл шва; *8* — основной металл

аэрозоль образуется главным образом вследствие испарения материалов электрода (покрытия и стержня). Доля расплава на стадии ванны в образовании аэрозоля существенно меньше. Схема образования аэрозоля представлена на рис. 134.

Пар, образующийся главным образом при испарении составляющих покрытия и стержня электрода, под воздействием плазменных потоков и давления дуги вытесняется из нижней зоны столба дуги в окружающее пространство с более низкой температурой. Здесь происходит конденсация паровой фазы и окисление некоторых продуктов конденсации (металлов и низших оксидов)

При сварке переменным током наибольшее количество пара образуется в каждый полупериод, когда величина сварочного тока достигает максимального значения [269]. Интересно, что максимум выделения паров не связан с характером переноса капель электродного металла.

Р. Хейл и Д. Хилл [254] пришли к выводу о существовании двух механизмов образования аэрозоля. Первый состоит в испарении составляющих плавящегося электродного и основного металлов, последующей конденсации образующихся паров при выходе их из высокотемпературной зоны столба дуги и окислении, второй — в образовании летучих оксидов на поверхности расплавленного электрода (например, SiO), которые могут образоваться при попадании кислорода в состав атмосферы дуги (например,

Таблица 30. **Пределы изменения состава ТССА при сварке покрытыми электродами, % (по массе)**

Электродное покрытие	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	F	Cr_2O_3	Ni
Ильменитовое	18—27	0,6—4,9	0,1—0,54	23,4—50,6	5,3—11,2	0,1—1,89	0,4—3	4,6—11,2	2,7—12,7	—	—	—
Рутиловое	17—36	0,6—5,5	0,1—1,4	24—53,8	4,7—10,2	0,1—1,8	0,1—2,5	3—11,4	5—10,8	—	—	—
Целлюлозное	10—12	1,9—1,5	0,1—0,6	42—80	5—5,5	0,2—0,3	До 0,7	0,4—5,2	3,3—7,5	—	—	—
Основное	3,8—11,5	0,1—0,93	0,1—2,2	10,5—35,2	2,5—8,2	1,5—17	0,1—15	1,9—33,6	1—30,3	11,4—23,5	—	—
Специальное для сварки нержавеющих сталей	1,4—16,5	0,3—46.7	0,7—4,4	1,9—31,3	1—15,8	3,9—57	0,12—2.67	0,3—24,5	2,3—29,9	2,5—32,7	1—34,5	0,01—1,3

при сварке в смеси газов Ar + O_2). Такие оксиды характеризуются высокой летучестью (большие значения давления насыщенного пара) при 1500—3000 К и являются причиной более интенсивного образования пара (аэрозоля) в процессе сварки. Доля участия каждого из этих механизмов в образовании аэрозоля зависит от способа сварки, состава защитных газов. Уменьшение окислительного потенциала защитного газа способствует снижению роли второго механизма в образовании аэрозоля.

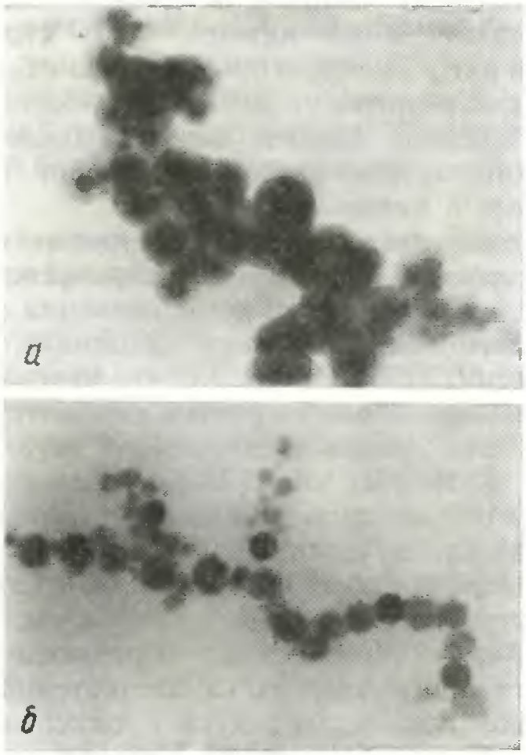


Рис. 135. Электронно-микроскопическое изображение частиц ТССА, образующихся при сварке электродами АНО-4 с покрытием рутилового вида (×200 000):

а — скопление частиц в кластеры; *б* — скопление частиц в виде цепочек.



Рис. 136. Типичное строение частицы ТССА, состоящей из ядра и оболочки.

Как отмечалось выше, в процессе сварки в паровую фазу могут попадать многие элементы, входящие в состав электрода и свариваемого металла. В результате конденсации пара образуются твердые частицы сложного состава. В состав ТССА, образующейся при сварке покрытыми электродами, входят основные (Mn, Fe, Si, K, Na, Ca, Mg, Ti, Al, Cr, Ni, F) и примесные (As, Cu, Rb, Sn, Zr, Sr, Nb, Mo, Ag, Sb, Ba, Pb) элементы. Содержание основных элементов колеблется от нескольких десятых процента до десятков процентов в зависимости от типа сварочного материала. Из-за сложности образующихся при конденсации пара соединений состав ТССА в литературных источниках приводят в виде массовой доли элементов или оксидов. В табл. 30 даны сведения о пределах изменения состава ТССА при сварке покрытыми элект-

родами [236, 268, 267, 263, 301, 285]. Подавляющее большинство частиц имеют размер менее 1 мкм [262, 285, 249, 30]. В результате действия электростатических сил и адсорбционных сил атмосферной влаги частицы образуют агломераты, линейный размер которых колеблется в пределах 1—3 мкм. Размеры отдельных частиц колеблются от сотых до десятых долей мкм. Более крупные частицы скапливаются в кластеры размером 1—2 мкм (рис. 135, *а*), а мелкие более склонны к образованию цепочек (рис. 135, *б*). Кроме того, в ТССА встречается небольшее число сферических частиц диаметром 5—10 мкм. Большинство мелких частиц состоит из ядра и оболочки (рис. 136). Ядро обогащено соединениями железа и марганца, а оболочка содержит соединения кремния, калия и натрия. Толщина оболочки зависит от температуры, окислительного потенциала атмосферы дуги и увеличивается с повышением содержания отмеченных выше элементов в покрытии электрода. Неоднородность структуры характерна для аэрозолей конденсации сложного состава.

Изучение структуры аэрозолей, образующихся при сварке покрытыми электродами, показало, что они имеют сложный состав [285, 249, 268, 30, 284].

В табл. 31 приведены результаты исследований фазового состава ТССА, образующейся при сварке электродами с покрытиями различного вида, а также порошковой проволокой и проволокой сплошного сечения в среде CO_2 [30]. Во всех исследованных ТССА обнаружены магнетит Fe_3O_4 и железомарганцевая шпинель $MnFe_2O_4$, а в некоторых ТССА — фтористый кальций (электроды УОНИ-13/45), фтористый натрий (электроды УОНИ-13/45, порошковая проволока ПП-АН8), сложные карбонаты натрия и калия K_2CO_3, Na_2CO_3 (электроды АНО-4, УОНИ-13/45, ЦМ-7). Кремний участвует в образовании аморфных силикатов натрия и калия. Установлено, что один и тот же элемент может входить в состав нескольких соединений. Например, калий образует соединения K_2CO_3, $KFeO_2$, $K_m(SiO)_n$, $KCaF_3$, фтор — CaF_2, NaF, FeF_3, MnF_2.

Содержание той или иной фазы ТССА

Таблица 31. **Фазовый состав ТССА при сварке покрытыми электродами [30]**

Электрод	*d*, нм	Фазовый состав
АНО-4	0,260	Fe_3O_4, $MnFe_2O_4$
	0,237	K_2CO_3, Na_2CO_3
	0,204	$MnFe_2O_4$
	0,164	$MnFe_2O_4$
	0,153	$MnFe_2O_4$
	0,141	Fe_3O_4
ЦМ-7	0,260	Fe_3O_4, $MnFe_2O_4$
	0,237	K_2CO_3, Na_2CO_3
	0,202	$MnFeO_4$
	0,156	$MnFe_2O_4$
	0,153	$MnFe_2O_4$
УОНИ-13/45	0,277	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$
	0,264	$MnFe_2O_4$
	0,235	NaF, Na_2CO_3
	0,224	Na_2CO_3
	0,202	$MnFe_2O_4$
	0,187	CaF_2
УОНИ-13/45	0,162	CaF_2, NaF
	0,156	$MnFe_2O_4$
	0,143	$MnFe_2O_4$
Св-08Г2С	0,332	α-SiO_2
	0,250	Fe_3O_4
	0,210	$MnFe_2O_4$
	0,170	Fe_3O_4
	0,161	Fe_3O_4
	0,151	$MnFe_2O_4$
	0,148	$MnFe_2O_4$
ПП-АН8	0,332	α-SiO_2
	0,253	Fe_3O_4, $MnFe_2O_4$
	0,240	NaF
	0,206	$MnFe_2O_4$
	0,171	$MnFe_2O_4$
	0,162	NaF
	0,148	Fe_3O_4

Примечание. *d* — межплоскостное расстояние.

зависит от состава сварочного материала, температуры и окислительного потенциала атмосферы дуги, давления паров элементов и их соединений при температуре плавления сварочной проволоки или электрода.

Неоднородность фазового состава частиц аэрозолей связана с тем, что высокотемпературный пар имеет сложный состав и отдельные его составляющие конденсируются при различной температуре. В первую очередь происходит конденсация элементов с более низким давлением пара ($P^{Mn}_{1040K} = 0{,}215$ Па, $P^{Fe}_{1052K} = 0{,}148 \cdot 10^{-5}$ Па), а затем элементов с более высоким давлением пара ($P^{Na}_{1196K} = 31{,}02 \cdot 10^5$ Па, $P^{K}_{1053K} = 30{,}9 \cdot 10^5$ Па) [97]. Кремний присутствует в высокотем-

пературном паре в широком температурном интервале (1500—3000 К) в виде SiO и характеризуется при этих температурах более высоким давлением пара, чем марганец и железо [254], поэтому кремний конденсируется вместе с низкотемпературными оксидами натрия и калия, образуя силикаты. Центрами конденсации пара могут быть как сами атомы элементов, так и мельчайшие брызги металла, выносимые из зоны дуги.

Данные о неоднородности строения частиц аэрозолей весьма важны для понимания природы биологической активности ТССА.

Для характеристики процесса образования аэрозоля при различных способах дуговой сварки в отечественной и зарубежной практике чаще всего используют следующие показатели: D — удельное выделение твердой составляющей сварочного аэрозоля, образующейся при расплавлении 1 кг электрода (г/кг или мг/кг); G — интенсивность выделения твердой составляющей сварочного аэрозоля, т. е. количество ТССА, выделяющейся при расплавлении электрода в единицу времени (г/ч или г/мин).

5. Испарение металлического и шлакового расплавов и образование сварочного аэрозоля

В литературе очень мало информации о вкладе металлической и шлаковой фаз в образование сварочного аэрозоля. В работе японских исследователей [285] отмечается, что в ТССА в заметных количествах поступают из шлака соединения кремния, калия, натрия, кальция и фтора. При сварке низководородными электродами, когда образуются высокоосновные фторсодержащие шлаки, в состав сварочного аэрозоля поступает большее количество соединений щелочных и щелочноземельных металлов, чем при сварке электродами с рутиловым, ильменитовым, кислым и целлюлозным видами покрытий. Оксиды титана, алюминия, магния, марганца поступают из шлака в сварочный аэрозоль в незначительных количествах.

Основой сварочного аэрозоля, образующегося при сварке всеми видами покрытых электродов, является железо (соединения железа). Чаще всего процессы испарения железа определяют количество образующегося аэрозоля.

При сварке конструкций из углеродистых сталей электродами с рутиловым, ильменитовым и целлюлозным покрытиями в составе ТССА наряду с соединениями железа в значительных количествах присутствуют соединения марганца. При использовании указанных выше электродов концентрация марганца в расплавленном металле (на стадиях капли и ванны) значительно ниже, чем в расплаве шлака. Однако упругость паров марганца над жидким металлом, содержащим растворенный марганец, при прочих равных условиях значительно выше, чем упругость паров марганца над шлаковым расплавом, в котором присутствуют оксиды марганца [222]. Это обстоятельство в значительной мере определяет повышенную концентрацию марганца в сварочном аэрозоле.

Испарение марганца и железа из металлических и шлаковых расплавов изучали с помощью установки, состоящей из времяпролетного масс-спектрометра МСХ-4 и специально изготовленной камеры с высокотемпературной ячейкой (рис. 137). Ячейка с образцом металла или шлака устанавливалась таким образом, чтобы эмиттируемые пары попадали в зону действия источника ионов.

Образцы помещались в высокотемпературную ячейку в тиглях из оксида алюминия (металлические образцы) или карбонитрида бора (образцы шлака). Камера ячейки и масс-спектрометр откачивались безмасляной высоковакуумной системой до давления 10^{-5} Па, причем камера ячейки откачивалась отдельным насосом. Для исследования состава потока пара ячейка с образцом нагревалась до 1200 К тепловым излучением кольцевого катода, а до более высокой температуры (1900 К) — с помощью электронной бомбардировки. Температура нагрева образцов (рис. 138) контролировалась вольфрам — вольфрам-рениевой термопарой, подключенной к самопишущему потенциометру.

Пары металла или шлака, образующиеся в процессе нагрева образца, попадали в зону действия источника ионов

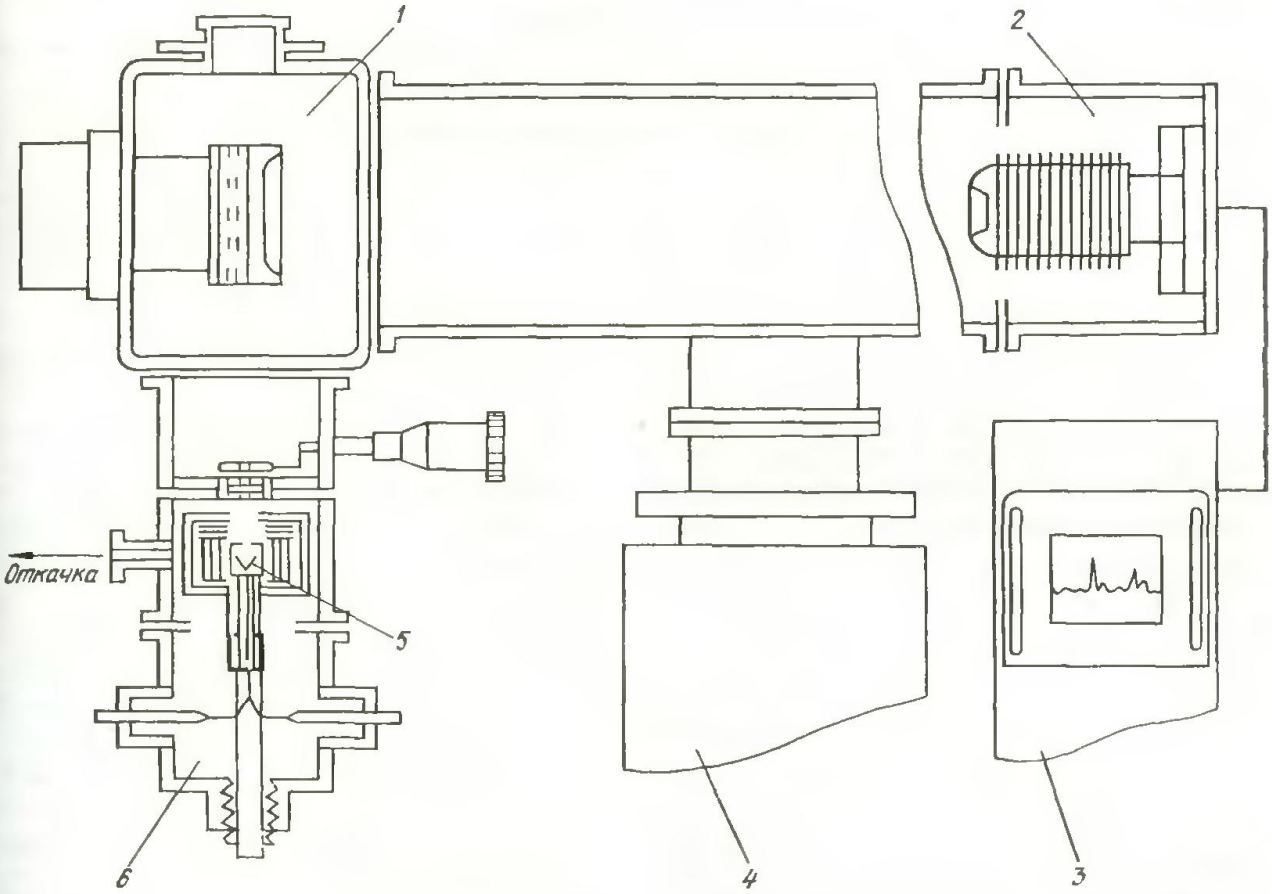


Рис. 137. Установка для исследований испарения марганца и железа из шлакового и металлического расплавов:

1 — источник ионов; *2* — вторично-электронный умножитель; *3* — стойка управления МСХ-4; *4* — высоковакуумный насос; *5* — высокотемпературная ячейка; *6* — испаритель.

через отверстие в перегородке, разделяющей ионный источник и камеру ячейки. Для учета газового фона поток пара можно было перекрывать подвижной заслонкой. Масс-спектрометр включался в момент начала нагрева образца. С этого момента непрерывно проводилось наблюдение масс-спектра, а его фотографирование осуществлялось с интервалом 1 мин на протяжении всего эксперимента. По полученным спектрам определяли момент появления тех или иных ионов, образующихся при электронной ионизации потока пара, и их относительную концентрацию, которая характеризовала процесс испарения различных элементов из образца.

С помощью описанной аппаратуры выполнена серия опытов, позволившая провести сравнительную оценку интенсивности испарения марганца, железа и их соединений с поверхности металлического и шлакового расплавов.

Стальные образцы вырезались из металла, наплавленного опытными электродами с рутиловым покрытием. Химический состав образцов, % (по массе):

	C	Mn	Si
М-1	0,09	0,26	0,07
М-2	0,10	0,60	0,10
М-3	0,10	1,13	0,07

Образцы сварочных шлаков получены при сварке электродами с различным содержанием рутила и мрамора в покры-

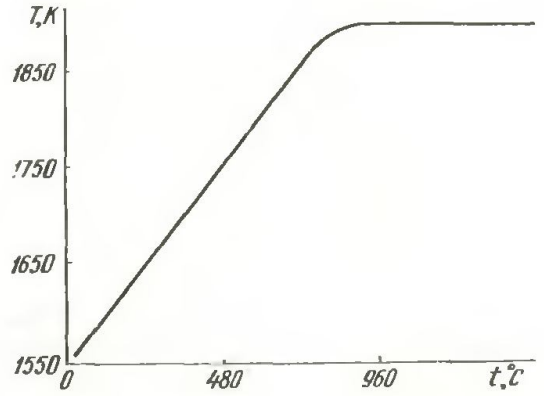


Рис. 138. Типичная кривая нагрева образцов.

Таблица 32. **Химический состав шлаков, % (по массе)**

Шлак	Основность	SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	MnO	FeO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O
Ш-1	0,6	15,1	39,6	1,7	0,5	14,2	20,5	4,1	1,6	1,8
Ш-2	1,2	16,3	23,0	15,1	0,7	15,1	20,4	4,6	1,6	2,1
Ш-3	2,2	17,8	3,9	27,3	0,9	15,1	24,3	5,8	1,5	1,5
Ш-4	0,5	14,5	49,1	8,8	0,5	2,0	13,0	5,2	2,2	1,7

тии. Различная основность шлаков обеспечивалась изменением соотношения указанных компонентов покрытия. Исходный химический состав сварочных шлаков с различной основностью и шлака с низким содержанием оксидов марганца представлен в табл. 32.

В масс-спектрах паров, образующихся при нагреве и плавлении исследуемых образцов металла и шлака, обнаружены ионы Mn^+ и Fe^+. Других марганец- и железосодержащих ионов в масс-спектрах не выявлено. Вероятно, они либо совсем отсутствовали, либо концентрация их в парах была ниже уровня чувствительности масс-спектрометра. По интенсивности пучков марганца или железа судили об интенсивности испарения этих элементов из образцов металла или шлака.

Зависимость интенсивности пучка ионов марганца от температуры и состава шлака представлена на рис. 139. Видно, что интенсивность испарения марганца из расплавленного шлака тем больше, чем выше его основность. По-видимому,

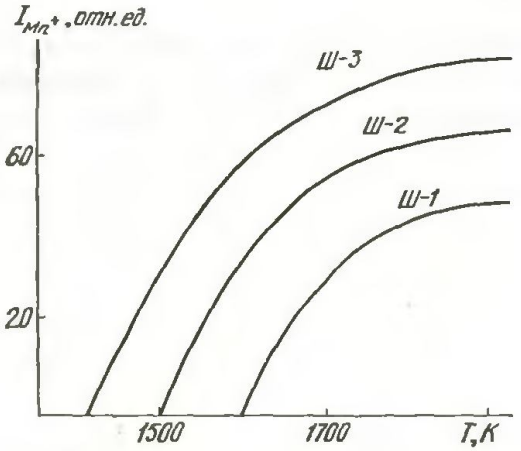


Рис. 139. Зависимость интенсивности пучка ионов марганца в парах над поверхностью расплавленного шлака от температуры нагрева и основности шлака.

это обусловлено увеличением активности марганца в шлаке.

На рис. 140 приведена зависимость интенсивности пучка ионов марганца от температуры металла и концентрации в нем марганца. С увеличением содержания марганца в расплаве возрастает интенсивность его испарения.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 139 и 140, показывают, что интенсивность испарения марганца из шлакового расплава, содержащего 10,8—11,6 % Mn (14—15 % MnO), приблизительно такая же, как интенсивность испарения из металлического расплава, содержащего 0,6—1,1 % Mn. Следует ожидать, что снижение концентрации марганца в шлаке до уровня его содержания в металлическом расплаве существенно уменьшит интенсивность испарения марганца. В связи с этим можно предположить, что шлаки с низким содержанием оксидов марганца могут быть использованы в качестве защитного слоя, препятствующего испарению марганца из жидкого металла.

Для проверки этого предположения провели следующий эксперимент. С помощью описанной выше методики и установки оценили интенсивность испарения марганца и железа из образца М-3, покрытого и не покрытого раплавленным шлаком Ш-4, при 1800—1900 К. Химический состав образцов металла М-3 и шлака Ш-4, использованных в эксперименте, приведен выше. Результаты представлены на рис. 141. Видно, что интенсивность испарения марганца и железа с поверхности металлического расплава резко снижается, когда он покрыт слоем низкомарганцовистого шлака. Следовательно, такой фактор, как кроющая способность шлака, может существенно влиять на содержание марганца в аэрозоле.

Результаты изучения испарения железа с поверхности металла и шлака представлены на рис. 142. Интенсивность испарения железа с поверхности шлакового расплава в несколько раз меньше, чем с поверхности расплавленного металла, и практически не зависит от основности шлака.

На основании результатов исследований можно заключить, что основным ис-

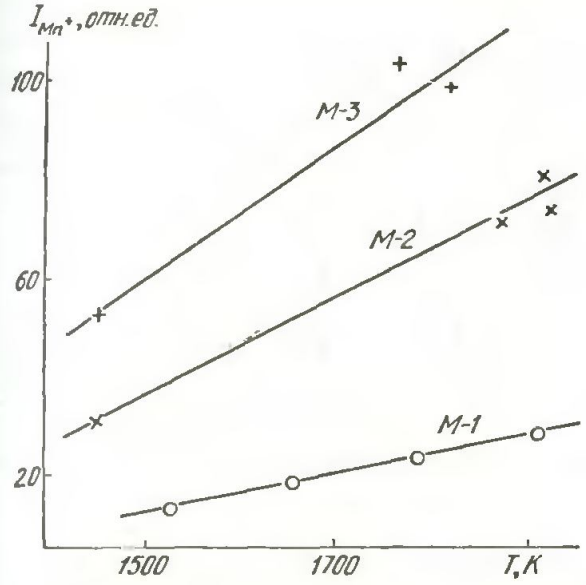


Рис. 140. Зависимость интенсивности пучка ионов марганца в парах над поверхностью металлического расплава от температуры нагрева расплава.

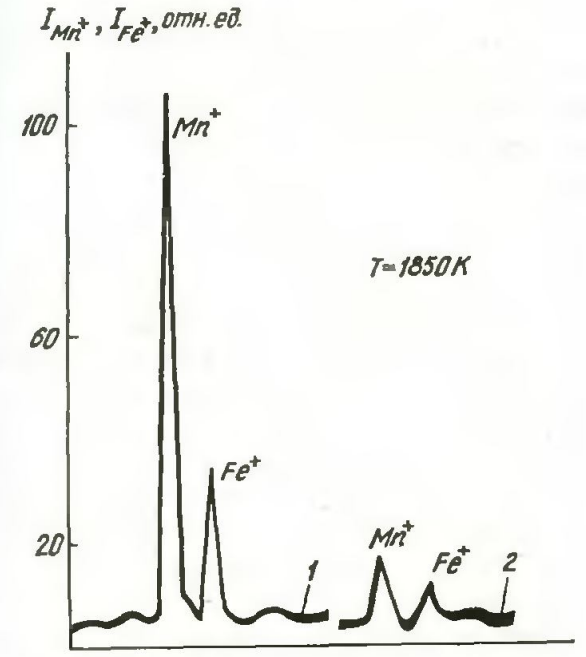


Рис. 141. Интенсивность пучков ионов марганца и железа в паре над свободной поверхностью металла (*1*) и над поверхностью, покрытой слоем шлака (*2*), $T = 1850$ К.

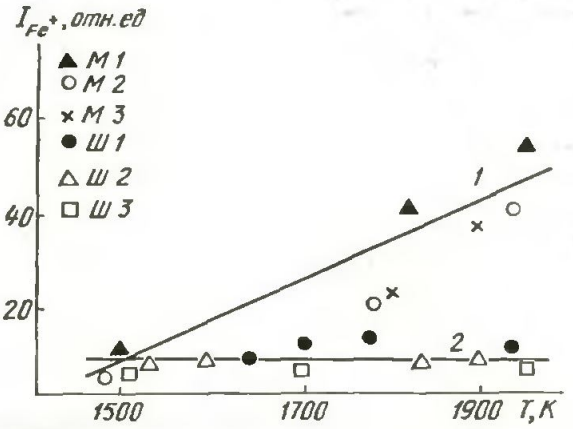


Рис. 142. Зависимость интенсивности пучков ионов железа в парах над поверхностью металла (*1*) и шлака (*2*) от температуры их нагрева.

точником поступления марганца и железа в сварочный аэрозоль является металлический расплав. Наличие на его поверхности пленки шлака препятствует испарению железа и марганца.

Интенсивность испарения марганца из расплавленного шлака увеличивается с ростом основности и содержания оксидов марганца, достигая значений, характерных для металлического расплава.

Интенсивность испарения железа из шлакового расплава практически не зависит от основности шлака и существенно меньше соответствующего показателя для расплавленного металла.

Следует отметить, что наряду с марганцем и железом заметный вклад в образование той доли сварочного аэрозоля, которая формируется при испарении составляющих металлического расплава, может вносить хром. Установлено, что наибольший переход хрома в ТССА имеет место в тех случаях, когда он входит в состав электродной проволоки. Переход хрома из основного металла или электродного покрытия в состав ТССА в несколько раз меньше [301]. При применении электродов, стержни которых изготовлены из нержавеющей стали, содержание хрома в ТССА может достигать 6—8 %. Результаты рассмотренных экспериментальных данных свидетельствуют о том, что металлический расплав — основной источник испарения железа, марганца и хрома.

Соединения щелочных и щелочноземельных металлов, кремния и фтора испаряются из шлакового расплава. Со-

Таблица 33. **Содержание оксидов натрия, калия, магния и кальция в ТССА [315], % (по массе)**

Сварочный материал	Na_2O и K_2O	MgO и CaO	Fe_2O_3 и Mn_2O_3
Электроды с покрытием:			
основным	20—38	5,3—17,8	17,7—44,4
рутиловым	15—32	—	40—74,8
Порошковые проволоки:			
для сварки в CO_2	—	1,3—23,1	47,2—78,6
самозащитные	—	5,2—68,5	18,9—73,9

Таблица 34. **Химический состав экспериментальных шлаков, % (по массе)**

Шлак	TiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	MnO	MgO	K_2O	Na_2O	Основность
ОК-1	—	3,1	23,1	30,2	17,9	16,4	1,1	1,4	0,8	2,73
ОК-2	20,7	3,1	18,3	20,9	15,7	13,4	1,2	1,2	0,7	1,45
ОК-3	40,2	2,9	14,2	3,2	16,6	13,0	1,5	1,4	0,8	0,45
ОМ-1	29,4	0,6	10,5	2,3	15,1	12,0	30,0	2,9	1,1	1,51
ОМ-2	39,7	0,7	9,7	2.4	16,0	10,5	13,6	3,6	1,2	0,86
ОМ-3	50,3	0,6	9,5	2,6	16,3	9,4	0,4	4,5	1,4	0,44

гласно данным работы [315], суммарное содержание оксидов щелочных и щелочноземельных металлов в составе ТССА сопоставимо с суммарным содержанием оксидов железа и марганца (табл. 33). Следовательно, интенсивность испарения указанных элементов должна оказывать большое влияние на показатели валовых выделений ТССА при сварке покрытыми электродами. Поэтому изучение особенностей испарения щелочных и щелочноземельных металлов наряду с анализом закономерностей испарения железа и марганца из оксидных и металлических расплавов представляет большой практический интерес.

Исследовались особенности испарения щелочных (натрий, калий) и щелочноземельных (магний, кальций) элементов из сварочных шлаков и их связь с выделением ТССА при сварке электродами с покрытием рутилового вида различной основности. Опыты проводили с помощью времяпролетного масс-спектрометра МСХ-4 по методике, описанной выше, с использованием шлаков двух серий. В шлаках серии ОК основность изменялась варьированием соотношения содержаний TiO_2 и CaO, в шлаках серии ОМ — содержаний TiO_2 и MgO. Основность шлаков определяли по формуле

$$B = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O + 0{,}5\,(FeO + MnO)}{SiO_2 + 0{,}5\,(TiO_2 + Al_2O_3 + ZrO_2)}. \quad (3.77)$$

Состав и основность опытных шлаков приведены в табл. 34. Интенсивность испарения калия, натрия, кальция и магния (или их соединений) оценивали с помощью указанной выше методики по масс-спектрам паров, образующихся при нагреве и плавлении исследуемых шлаков.

Обобщенные результаты исследований представлены на рис. 143. Видно, что увеличение основности шлака способствует более интенсивному испарению калия, натрия, магния и кальция, причем начало этого процесса смещается в область более низких температур. Это можно объяснить ростом активности указанных элементов, обусловленным структурными изменениями в жидком шлаке [11], снижающими энергию активации диффузии.

Следует отметить, что испарение магния и кальция из шлаков с низкой основностью (ОК-3 и ОМ-3), соответствующих реальным шлакам электродов с покры-

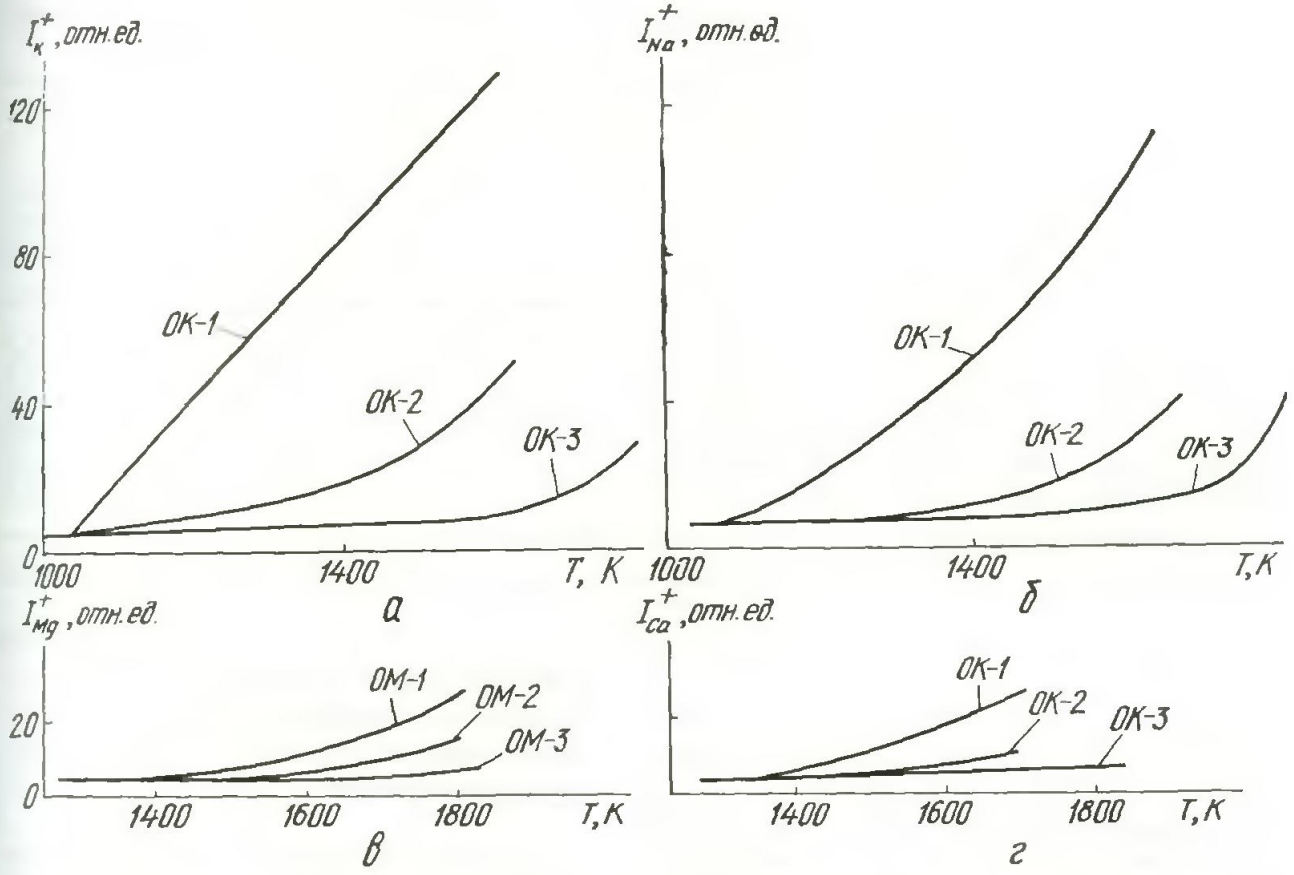


Рис. 143. Интенсивность пучка ионов калия (*а*), натрия (*б*), магния (*в*) и кальция (*г*) в паровой фазе над поверхностью экспериментальных шлаков.

тием рутилового вида, практически не наблюдается, в то время как калий и натрий испаряются довольно интенсивно. Сопоставление данных, приведенных на рис. 143, показывает, что из шлаков, характеризующихся одинаковой основностью (например, ОК-2 и ОМ-1), по мере возрастания температуры испаряются калий и натрий, а затем магний и кальций. Результаты эксперимента находятся в прямом соответствии с изменением упругости пара указанных элементов над соответствующими однокомпонентными расплавами (рис. 144).

Приведенные на рис. 143 зависимости интенсивности испарения калия, натрия, магния и кальция от основности шлака проверяли в реальных условиях сварки покрытыми электродами, при сварке которыми шлаки имеют состав, приведенный в табл. 34 (индексы шлаков, аэрозолей и электродов, при сварке которыми они образуются, одинаковы). В процессе сварки оценивали валовые выделения и химический состав ТССА.

Из полученных экспериментальных данных (табл. 35) видно, что интенсивность испарения калия, натрия, магния и кальция оказывает большое влияние на валовые выделения и химический состав ТССА. Установлено, что увеличение основности электродного покрытия приводит к значительному возрастанию в составе ТССА содержания соединений калия и натрия, причем этот прирост по абсолютной величине наибольший у ка-

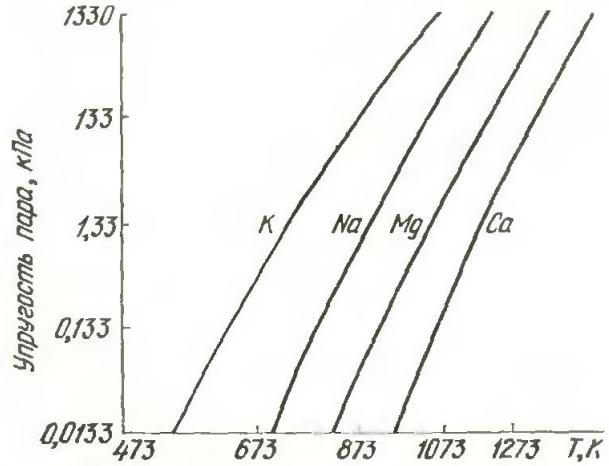


Рис. 144. Температурные зависимости упругости пара калия, натрия, магния и кальция [222].

Таблица 35. **Валовые выделения и химический состав ТССА экспериментальных электродов, % (по массе)**

Электрод	$I_{св}$, А	$U_д$, В	Валовые выделения ТССА		Na	K	Mg	Ca	Mn	Si	Fe	Ti	Al
			G_1, г/мин	D_1, г/кг электродов									
ОК-1	200	25	0,66	17,4	13,6	18,2	0,1	0,2	5,6	2,0	24,6	0,4	0,3
ОК-2	200	26	0,60	15,4	11,4	13,8	0,1	0,2	5,0	4,3	26,8	0,8	0,3
ОК-3	200	28	0,45	11,8	3,8	6,4	0,1	0,1	6,0	7,9	41,3	0,9	0,5
ОМ-1	220	26	1,07	23,3	7,4	24,5	1,1	0,1	5,5	4,1	24,1	0,4	0,3
ОМ-2	220	29	0,71	14,2	6,8	23,1	0,7	0,1	5,4	5,9	26,1	0,7	0,3
ОМ-3	220	29	0,56	10,5	6,4	19,5	0,2	0,1	5,6	9,3	30,2	1,1	0,3

Примечание. Валовые выделения ТССА оценивали методом полной фильтрации сварочного аэрозоля, химический состав — рентгеновским флуоресцентным анализом.

лия. Что касается содержания в ТССА щелочноземельных элементов, то здесь сохраняется обнаруженная при исследовании шлаков закономерность, причем содержание магния в ТССА (серия ОМ) существенно выше, чем кальция (серия ОК). Таким образом, закономерности, установленные при сварке опытными электродами, совпадают с закономерностями, обнаруженными при изучении особенностей испарения шлаков. В основном весь прирост валовых выделений ТССА обусловлен испарением щелочных металлов.

Из полученных результатов следуют и практические рекомендации. Для уменьшения валовых выделений ТССА необходимо увеличивать кислотность шлака с целью повышения в нем содержания структурообразующих анионов кремния, титана и алюминия, снижающих интенсивность испарения калия, натрия, магния и кальция. К аналогичному результату должно приводить ограничение в шлаке содержания катионов калия, натрия, магния и кальция, оказывающих на шлак модифицирующее действие. Применительно к составу электродного покрытия это означает, что в нем надо снижать содержание карбонатов (мрамора, магнезита и т. п.), а также алюмосиликатов калия и натрия (сухой остаток жидкого стекла, слюда, полевой шпат и т. п.), и повышать содержание TiO_2, SiO_2 и Al_2O_3.

6. Взаимосвязь валовых выделений, химического состава сварочного аэрозоля и условий сварки

Испарение электродного и основного материалов при сварке, в результате которого образуется сварочный аэрозоль, в значительной мере зависит от температурных условий в зоне дугового разряда. Последние, как показано в параграфе 3, зависят от режимов сварки: сварочного тока, полярности и напряжения. Отечественными и зарубежными исследователями [223, 270, 241, 310] однозначно установлено, что независимо от типа применяемых электродов увеличение сварочного тока приводит к росту валовых выделений сварочного аэрозоля. Это обусловлено повышением температуры капель металла на торце электрода [49, 148], что приводит к интенсификации процессов испарения. На рис. 145 показана типичная зависимость валовых выделений ТССА от величины сварочного тока при сварке электродами диаметром 3,2—8 мм с покрытием ильменитового вида. Режимы сварки представлены ниже:

$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В
3,2	100	23—24
	130	25—26
4	130	24—25
	180	27—29
5	180	27—28

	250	32—34
6	250	31—33
	310	35—37
8	360	35—37
	340	40

По данным работы [270] зависимость интенсивности выделения ТССА от силы сварочного тока имеет параболический характер и описывается уравнением

$$G = AI^n, \qquad (3.78)$$

где G — в мг/мин; A и n — эмпирические постоянные, величина которых зависит от вида покрытия: $A = 0{,}0361$ для электродов с ильменитовым покрытием, $A = 0{,}4519$ для электродов с рутиловым покрытием, $A = 0{,}0697$ для электродов с основным покрытием, показатель n соответственно равен 1,73; 1,17 и 1,65. Необходимо отметить, что электрод меньшего диаметра выделяет больше ТССА, чем электрод большего диаметра, если сварка выполняется на токе одинаковой величины. По-видимому, это обусловлено тем, что при одинаковом сварочном токе плотность его на меньшем диаметре электрода (а следовательно, и температура нагрева капель на торце электрода) выше, чем на электроде большего диаметра. Это и является причиной большей интенсивности испарения расплава и выделения аэрозоля электродом меньшего диаметра.

Зависимость удельного выделения ТССА от сварочного тока имеет более пологий характер по сравнению с зависимостью интенсивности выделения ТССА. Это объясняется одновременным увеличением скорости плавления электродов с ростом сварочного тока. Поэтому показатель выделения ТССА в расчете на единицу массы сожженного электрода растет не столь значительно, как показатель интенсивности выделения.

Увеличение тока сопровождается, как правило, ростом номинального напряжения на дуге, т. е. мощность сварочной дуги растет не только из-за роста тока, но и в результате увеличения напряжения дуги. Наблюдается пропорциональная зависимость интенсивности выделения ТССА от мощности дуги.

Установлено, что большое влияние на валовые выделения ТССА оказывает напряжение дуги [241, 270, 267]. Его увеличение вследствие удлинения дуги вызывает существенное увеличение валовых выделений ТССА. Это обусловлено, во-первых, ухудшением условий защиты расплавленного металла на торце электрода от кислорода окружающего воздуха, т. е. увеличением окислительного потенциала атмосферы дуги, что, как показано выше, интенсифицирует процесс выделения сварочного аэрозоля. Во-вторых, прирост мощности дуги, вызванный ростом напряжения из-за ее удлинения, бесполезно тратится на излучение в окружающее пространство, практически не увеличивая скорость плавления электрода. В результате оба показателя, характеризующие валовые выделения сварочного аэрозоля — интенсивность G и удельное выделение D ТССА,— растут при удлинении дуги.

Если увеличение напряжения дуги обусловлено ее сжатием, оно также вызывает рост валовых выделений ТССА, но в меньшей мере, чем удлинение дуги, так как при сжатии дуги условия защиты зоны плавления электрода от окружающего воздуха не ухудшаются.

Сведения о влиянии рода тока и полярности на валовые выделения ТССА противоречивы. В большинстве работ отмечается, что при прочих равных условиях

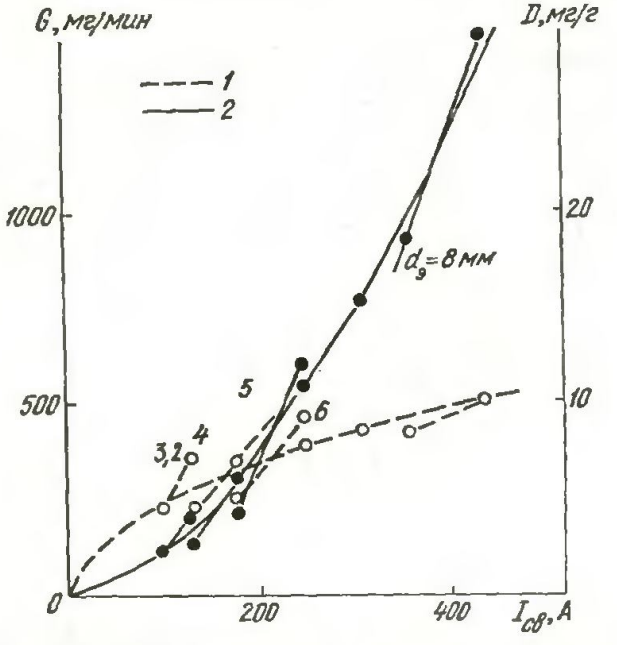


Рис. 145. Зависимость удельных выделений ТССА (штриховые кривые) и их интенсивности (сплошные кривые) от величины сварочного тока при сварке электродами с ильменитовым покрытием диаметром 3,2—8 мм.

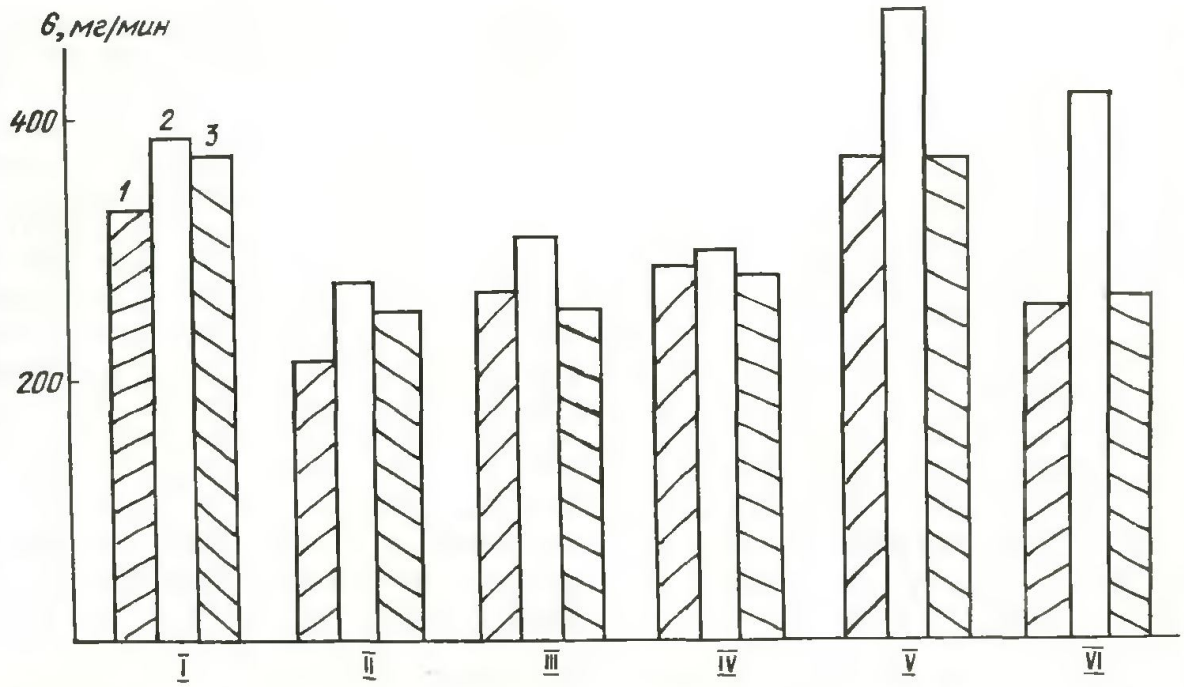


Рис. 146. Зависимость интенсивности выделения ТССА от рода и полярности тока при сварке электродами с покрытиями:

I — ильменитовое; *II* — рутил-карбонатное; *III* — рутиловое; *IV* — кислое с большим содержанием железного порошка; *V* и *VI* — основное (карбонатно-флюоритное); *1* — переменный ток; *2* — постоянный ток, обратная полярность; *3* — то же, прямая полярность.

наибольшая интенсивность выделения ТССА наблюдается при сварке постоянным током обратной полярности [270, 262]. Этот факт хорошо согласуется с

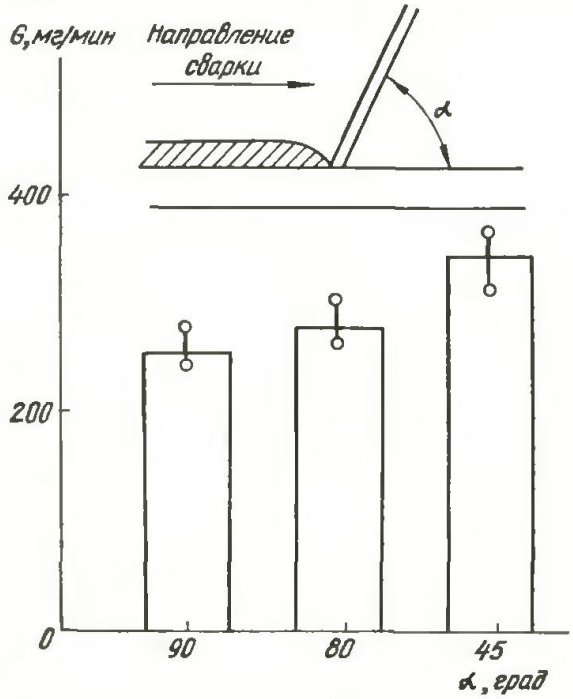


Рис. 147. Зависимость интенсивности выделения ТССА от угла наклона электрода.

экспериментальными данными о более высокой температуре капель на торце электрода при сварке на обратной полярности. Однако в некоторых работах [241] отмечается, что при сварке высокопроизводительными электродами с рутиловым и кислым покрытиями наибольшая интенсивность выделения ТССА имеет место при сварке на прямой полярности. При сварке переменным током интенсивность выделения ТССА, как правило, ниже, чем при сварке постоянным током. Такую зависимость можно объяснить периодическим снижением сварочного тока до нулевого значения (в отличие от постоянного тока), что влечет за собой соответствующие температурные изменения нагрева металла на торце электрода и интенсивности испарения плавящегося электродного материала [269]. Типичный пример влияния рода тока и полярности на интенсивность выделения ТССА при сварке электродами диаметром 4 мм с покрытиями различного вида представлен на рис. 146.

Из показателей, характеризующих режим сварки, только скорость сварки не оказывает заметного влияния на валовые выделения ТССА.

Отклонение положения электрода от вертикали приводит к небольшому увеличению интенсивности образования ТССА [270]. По-видимому, рост выделения ТССА в этом случае (рис. 147) об-

условлен некоторым ухудшением защиты зоны плавления электрода от кислорода окружающего воздуха.

В литературе встречаются сведения о влиянии на валовые выделения ТССА характера разделки свариваемых кромок, вида сварных соединений и их расположения в пространстве, техники сварки [263. 267, 270].

7. Взаимосвязь валовых выделений, химического состава сварочного аэрозоля и составляющих покрытия

Состав электродного покрытия оказывает большое влияние на ряд факторов, от которых зависят показатели валовых выделений сварочного аэрозоля и его химический состав, а именно: содержание в шлаковом расплаве, образующемся в результате плавления покрытия на торце электрода, соединений с высокой упругостью давления пара, которые вносят большой вклад в образование сварочного аэрозоля; характеристика основности (кислотности) шлака, от которой зависит интенсивность испарения отдельных его составляющих; окислительный потенциал атмосферы дуги. Величина номинального напряжения сварочной дуги — один из наиболее весомых факторов, определяющих валовые выделения ТССА.

Для понимания отличий в показателях валовых выделений сварочного аэрозоля и его химическом составе при сварке различными типами электродов рассмотрим особенности строения основных (наиболее часто встречающихся) видов электродных покрытий.

В отечественной и зарубежной практике производства электродов для ручной дуговой сварки электродные покрытия делятся на следующие виды: кислые, рутиловые, целлюлозные, основные, окислительные.

Кислые покрытия. Шлакообразующую основу покрытий этого вида составляют оксиды железа и марганца (вводятся в покрытие в виде железной и марганцевой руд), а также различные алюмосиликаты (полевой шпат, гранит, слюда, каолин и др.). Для раскисления сварочной ванны в кислые покрытия вводят большое количество ферромарганца, реже другие ферросплавы. В качестве газозащитных материалов используют небольшие количества органических добавок, например целлюлозы. При плавлении покрытий кислого вида образуются шлаки, состоящие преимущественно из оксидов железа, марганца и кремния. Небольшое количество оксидов щелочных металлов попадает в шлак вследствие плавления щелочных алюмосиликатов и сухого остатка связующего — жидкого стекла. Образующийся в результате плавления кислого покрытия шлак характеризуется высокой кислотностью главным образом из-за большого содержания в нем диоксида кремния.

Рутиловые покрытия. Шлакообразующую основу покрытий этого вида составляет диоксид титана (вводится в покрытие в виде минерала рутила). Его содержание в покрытии может достигать 50 %. Наряду с рутилом в состав покрытия входят различные алюмосиликаты и карбонаты (мрамор, мел, известняк, магнезит). Если содержание карбонатов в покрытии превышает 7—10 %, они называются рутил-карбонатными. Существуют рутиловые покрытия, в составе которых карбонаты отсутствуют. В качестве раскислителей в рутиловых покрытиях используют ферромарганец, содержание которого ниже, чем в кислых покрытиях. Это объясняется более низким окислительным потенциалом рутилового покрытия по сравнению с кислым. Содержание целлюлозы в рутиловых покрытиях может находиться в широких пределах — 2—15 %. При плавлении рутилового покрытия также образуется кислый шлак. Однако наряду с диоксидом кремния в шлаке находится большое количество диоксида титана. Количество оксидов щелочных металлов (Na_2O, K_2O) в рутиловых шлаках такое же, как и в шлаках, образующихся при плавлении кислых покрытий, а оксидов железа и марганца значительно меньше. Содержание оксидов кальция и магния может быть в широких пределах — от долей процента до 15 % в зависимости от количества карбонатов в покрытии. Поэтому и кислотность рутиловых шлаков, образующихся при сварке различными мар-

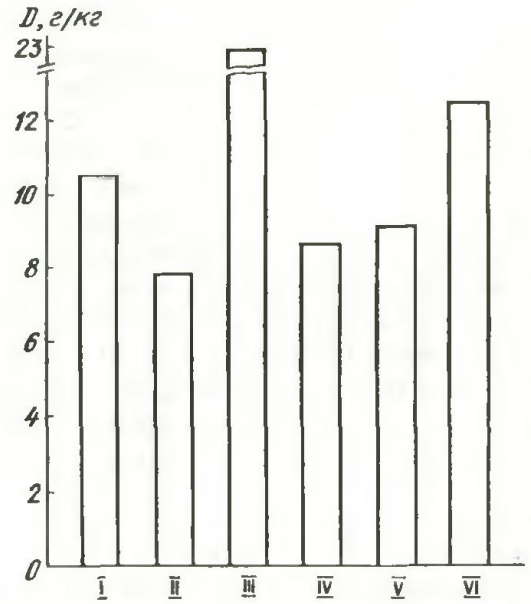


Рис. 148. Удельные выделения ТССА при сварке электродами с покрытиями [285]:

I — ильменитовое; *II* — рутил-карбонатное; *III* — целлюлозное; *IV* — рутиловое; *V* — кислое с большим содержанием железного порошка; *VI* — основное ($d_э = 5$ мм, $I_{св} = 230$ А).

ками электродов, может существенно различаться в зависимости от количества карбонатов в электродном покрытии.

Целлюлозные покрытия. Эти покрытия отличаются от других высоким содержанием органических материалов (целлюлозы, карбоксиметилцеллюлозы и др.) — до 30 %. Шлакообразующую основу покрытия составляют рутил и различные алюмосиликаты. Раскисление сварочной ванны осуществляется, как правило, ферромарганцем. В качестве связующего используется натриевое или калиевое жидкое стекло. При плавлении целлюлозных покрытий образуется мало шлака (вследствие большой доли в покрытии органических материалов, сгорающих в процессе сварки с образованием большого количества газов CO_2, CO, H_2, H_2O, углеводородов, и из-за небольшой толщины покрытия, наносимого на стержень). Состав шлака существенно не отличается от состава шлака, образующегося при плавлении рутиловых покрытий.

Окислительные покрытия. В его состав входят главным образом оксиды железа (иногда с оксидами марганца) и небольшое количество алюмосиликатов, поэтому при плавлении этого покрытия образуется сильно окислительный шлак. Электроды с окислительным покрытием применяются в настоящее время в небольших объемах.

Основные покрытия. Шлакообразующую основу покрытия этого вида составляют карбонаты и фториды (преимущественно бифторид кальция в виде плавикового шпата или флюоритового концентрата), иногда небольшое количество алюмосиликатов или кремнезема. Раскисление сварочной ванны осуществляется ферромарганцем, ферросилицием, ферротитаном и другими активными раскислителями. Шлаки, образующиеся при плавлении основных покрытий, содержат большое количество основных оксидов, и поэтому характеризуются высокой основностью (низкой кислотностью).

Существуют смешанные виды покрытий: рутилово-кислые (ильменитовые), рутил-целлюлозные, рутил-основные и др.

Испытания большого количества электродов промышленных марок, выполненные в различных странах, показывают, что наибольшие выделения аэрозоля характерны для электродов с целлюлозным покрытием. За ними следуют низководородные электроды с покрытием основного вида. Электроды с кислыми, рутиловыми и ильменитовыми покрытиями по показателям валовых выделений ТССА между собой различаются незначительно, а по сравнению с электродами с целлюлозным и основным покрытиями характеризуются заметно меньшим выделением аэрозоля. На рис. 148 приведены типичные данные об удельных выделениях ТССА при сварке электродами с покрытиями различного вида [285].

Высокий уровень выделения сварочного аэрозоля при сварке электродами с целлюлозным покрытием обусловлен, по нашему мнению, следующими причинами: высоким номинальным напряжением вследствие сжатия дуги газами (CO, CO_2, H_2, H_2O), образующимися при сгорании органических составляющих целлюлозного покрытия [104]; поступлением в расплавленную каплю на торце электрода углерода, образующегося в результате разложения целлюлозы в покрытии, и увеличением интенсивности выделения

ТССА из-за развития процессов взрыва жидких капель вследствие окисления углерода и образования CO [311].

Высокий уровень выделения сварочного аэрозоля при сварке электродами с основным покрытием обусловлен наличием в покрытии летучих соединений фтора и высокой основностью шлаковой фазы, способствующей более интенсивному поступлению в сварочный аэрозоль соединений щелочных металлов [151]. Большое содержание карбонатов (мрамора, мела, известняка, магнезита, доломита) в покрытии способствует сжатию дуги углекислым газом, образующемся при их разложении, что также приводит к увеличению валовых выделений сварочного аэрозоля.

Анализ [241, 310, 236, 267, 268, 263, 301, 285] показывает, что при сварке электродами с рутиловым, кислым и ильменитовым покрытиями образуются сварочные аэрозоли, близкие по химическому составу. Основой твердой составляющей сварочного аэрозоля являются оксиды железа. Из шлаковой фазы в аэрозоль поступают главным образом SiO_2 (20—30 %), K_2O (5—10 %), Na_2O (6—10 %). Переход из шлака в аэрозоль соединений кальция, магния, алюминия и титана незначителен. Содержание этих элементов в ТССА в пересчете на их оксиды составляет: 0,1—0,8 % CaO, 0,1—0,3 % Al_2O_3, 0,1—2 % TiO_2, 0,1—3 % MgO. Содержание наиболее токсичной составляющей ТССА — оксидов марганца при сварке электродами общего назначения лежит в сравнительно узких пределах (5—10 %). Это является результатом испарения его главным образом из металлического расплава, в котором концентрация марганца при сварке различными марками электродов также изменяется в сравнительно узком интервале.

Состав ТССА, образующейся при сварке целлюлозными электродами, отличается от состава, образующегося при сварке рассмотренными выше электродами лишь более высоким содержанием оксидов железа из-за некоторого снижения количества остальных составляющих. Состав ТССА при сварке электродами с покрытием основного вида существенно отличается: наличием большого количества фторидов (10—20 % в пересчете на фтор); более высоким, чем при сварке кислыми, рутиловыми и целлюлозными электродами, количеством соединений щелочных и щелочно-земельных металлов (6—25 % Na_2O, 5—30 % K_2O, 7—15 % CaO, 0—8 % MgO, причем сумма $K_2O + Na_2O$ составляет 20—40 %, а их соотношение определяется главным образом составом жидкого стекла — связующего); более низким содержанием оксидов кремния (4—12 %) и железа (10—20 % Fe_3O_4). Эти отличия обусловлены в первую очередь наличием фторидов в составе основного покрытия и высокой основностью образующихся при плавлении покрытия шлаков.

Наиболее вредными соединениями, которые входят в состав ТССА, являются соединения марганца и фтора. Необходимо отметить, что содержание оксидов марганца в ТССА, образующейся при сварке электродами с основным покрытием, ниже, чем при сварке электродами других видов, и составляет обычно 3—5 %. Это объясняется более низким содержанием ферромарганца в покрытиях основного вида.

Результаты испытаний большого количества промышленных марок электродов отечественного и зарубежного производства показывают, что различные марки электродов с покрытием одного и того же вида характеризуются различными валовыми выделениями и химическим составом ТССА. Эти различия обусловлены главным образом составом покрытий, который определяет состав шлака (его основность, наличие соединений с высокой упругостью давления паров), величину номинального напряжения сварочной дуги, т. е. тех факторов, которые оказывают наиболее ощутимое влияние на интенсивность образования и состав сварочного аэрозоля.

Важнейшими характеристиками сварочного шлака, которые определяются составом покрытия, как указывалось выше, являются основность и окислительный потенциал. Для оценки влияния роли основности на валовые выделения ТССА при сварке электродами с покрытием рутилового вида изготовлены две серии электродов: серия ОП, в которой

Таблица 36. **Состав покрытий электродов серий ОП и ОМ, % (по массе)**

Составляющая покрытия	ОП-1	ОП-2	ОП-3	ОМ-1	ОМ-2	ОМ-3
Рутил	50	25	—	50	25	—
Мрамор	—	—	—	—	25	50
Перовскит	—	25	50	—	—	—
Слюда	10	10	10	10	10	10
Железный порошок	12	12	12	12	12	12
Марганцевая руда	25	25	25	25	25	25
Целлюлоза	3	3	3	3	3	3

Примечание. Для определения валовых выделений ТССА изготовлены электроды диаметром 4 мм, в качестве связующего применялось натриево-калиевое жидкое стекло в количестве 30 % от массы сухой шихты.

Таблица 37. **Влияние основности шлака на валовые выделения ТССА**

Электрод	Основность шлака	$U_д$, В	Валовые выделения ТССА	
			г/кг электродов	г/мин
ОП-1	0,63	27—28	12,3	0,48
ОП-2	0,92	25—26	10,6	0,38
ОП-3	1,25	24—25	9,1	0,35
ОМ-1	0,45	26—27	11,8	0,45
ОМ-2	1,45	29—31	15,4	0,60
ОМ-3	2,73	32—33	17,4	0,67

Таблица 38. **Состав покрытия электродов серии Е, вес. ч.**

Составляющая покрытия	Е-1	Е-2	Е-3	Е-4
Рутил	40	40	40	40
Слюда	10	10	10	10
Полевой шпат	10	10	10	10
Перовскит	25	25	25	25
Гематит	—	10	20	40
Ферромарганец	13	13	13	13
Целлюлоза	1,5	1,5	1,5	1,5
КМЦ	0,5	0,5	0,5	0,5

основность образующегося шлака менялась изменением соотношения в покрытии рутила (TiO_2) и перовскита ($TiO_2 \times CaO$), и серия ОМ, в которой основность шлака менялась изменением соотношения в покрытии рутила (TiO_2) и мрамора ($CaCO_3$). Таким образом, в электродах серии ОМ, кроме основности шлака, изменялся и окислительный потенциал атмосферы дуги, так как увеличение количества мрамора в покрытии электродов приводило к увеличению содержания основных оксидов кальция в шлаке и парциального давления CO_2 (окислительного газа) в атмосфере дуги. Состав покрытий опытных партий электродов представлен в табл. 36.

Валовые выделения ТССА определялись при сварке переменным током, ток во всех экспериментах составлял 200 А. Показатели валовых выделений ТССА опытных электродов приведены в табл. 37.

Как видно из приведенных данных, изменение основности шлака введением в покрытие оксидов кальция в виде перовскита и в виде карбоната кальция, оказывает прямо противоположное влияние на валовые выделения ТССА. В серии ОП увеличение основности шлака вызывает некоторое снижение валовых выделений ТССА, что, по-видимому, объясняется снижением номинального напряжения на дуге из-за увеличения в покрытии содержания Са, который имеет низкий потенциал ионизации. В серии ОМ увеличение количества карбоната кальция в покрытии приводит к значительному повышению валовых выделений ТССА, вызванному значительным сжатием столба дуги углекислым газом. Сжатие дуги приводит к повышению номинального напряжения (мощности) дуги, что обусловливает более интенсивное плавление электрода и выделение ТССА. Таким образом, в обоих случаях изменение основности оказывает влияние на валовые выделения ТССА путем воздействия на дугу (т. е. изменяя ее мощность).

Для оценки влияния окислительного потенциала шлака была изготовлена серия опытных электродов с рутиловым покрытием, в котором изменяли содержание гематита, пропорционально снижая содержание остальных составляющих покрытия. Состав покрытия опытных электродов представлен в табл. 38.

Диаметр электродов — 4 мм, диаметр покрытия — 6 мм, в качестве связующего применялось натриево-калиевое жидкое стекло. Сварка выполнялась переменным током, ток во всех экспериментах состав-

Таблица 39. **Химический состав, % (по массе), и основность шлаков электродов**

Электрод	Основность шлака	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MnO	K_2O	Na_2O
Е-1	0,59	17,3	42,3	5,0	8,8	9,5	8,8	2,6	1,5
Е-2	0,72	16,8	39,4	4,5	14,5	8,6	9,2	2,4	1,5
Е-3	0,86	16,6	37,2	4,0	21,5	7,8	9,3	2,2	1,4
Е-4	1,17	15,8	34,2	3,1	36,1	6,3	8,7	1,8	1,4

лял 190 А. Химический состав и основность шлаков, образующихся при плавлении опытных электродов, представлены в табл. 39. Данные о валовых выделениях ТССА приведены в табл. 40. Видно, что лишь при очень высоких содержаниях оксидов железа (вариант Е-4) наблюдается значительное увеличение валовых выделений ТССА несмотря на незначительное увеличение мощности дуги. Вероятно, это объясняется ухудшением защитных свойств шлака, что приводит к более интенсивному испарению расплавленного металла и увеличению содержания кислорода в атмосфере дуги, образующегося в результате диссоциации оксидов железа при высоких температурах в зоне дуги (кислород, как показано выше, интенсифицирует процесс образования сварочного аэрозоля).

Существенное влияние на образование аэрозолей оказывают органические добавки. Чем больше их в покрытии, тем выше номинальное напряжение дуги и интенсивность выделения аэрозоля (табл. 41). Химический состав ТССА при этом практически не изменяется. Следует отметить, что при равных содержаниях в электродном покрытии КМЦ обеспечивает меньшую величину номинального напряжения, чем электродная целлюлоза, и благодаря этому меньшую интенсивность пылевыделения.

Эффективным направлением повышения производительности ручной дуговой сварки является использование электродов с железным порошком в покрытии. В этом случае повышение производительности обеспечивается благодаря расплавлению дополнительного присадочного металла, содержащегося в покрытии, снижению потерь металла от разбрызгивания и более высоким допустимым значениям сварочного тока [281]. Эффективность использования железного порошка значительно возрастает при одновременном увеличении толщины электродного покрытия. При этом изменяются условия и интенсивность плавления электродного материала, что, несомненно, оказывает влияние на процессы образования аэрозоля.

Для изучения влияния толщины электродного покрытия и содержания в нем железного порошка на валовые выделения и состав ТССА были изготовлены три серии электродов диаметром 4 мм с различным содержанием железного порошка в покрытии. В каждой серии изменяли

Таблица 40. **Влияние окислительного потенциала шлака на валовые выделения ТССА**

Электрод	$U_д$, В	Валовые выделения ТССА		
		г/кг электродов	г/мин	г/кг наплавленного металла
Е-1	21	11,5	0,42	15,1
Е-2	22	10,0	0,34	12,8
Е-3	22	12,8	0,44	17,4
Е-4	23	21,5	0,74	28,1

Таблица 41. **Влияние типа и количества целлюлозы в электродном покрытии на валовые выделения ТССА**

Тип целлюлозы	Массовое содержание целлюлозы в покрытии, %	$U_д$, В	Валовые выделения ТССА, г/мин
ЭЦ	—	27	0,56
	2	30	0,61
	4	32	0,72
	8	34	0,79
КМЦ	2	28	0,48
	4	30	0,65

Примечание. $I_{св} = 270$ А.

Таблица 42. **Валовые выделения и состав ТССА при плавлении электродов**

Электрод	Диаметр покрытия, мм	$U_д$, В	Валовые выделения ТССА			Содержание в ТССА, %		
			г/кг электродов	г/кг наплавленного металла	г/мин	Mn	Fe	Si
A-1	6,2	30—32	13,2	25,2	0,72	9,3	32,4	11,5
A-2	8,0	36—38	13,8	29,0	0,82	9,0	29,5	11,4
A-3	9,4	40—42	13,8	32,5	0,94	8,9	24,0	11,6
B-1	6,2	27—29	12,7	16,2	0,51	8,2	31,7	8,1
B-2	8,0	32—34	13,5	22,5	0,72	7,6	25,2	8,2
B-3	9,4	35—37	13,9	25,2	0,85	8,0	22,9	8,3
C-1	6,2	24—26	10,7	12,1	0,41	6,8	33,5	6,7
C-2	8,0	30—32	10,9	15,5	0,60	5,9	30,8	6,9
C-3	9,4	32—34	11,5	16,4	0,73	6,7	25,7	6,6

Примечание. $I_{св} = 200$ А.

толщину покрытия при неизменном его составе. В покрытии электродов серии А содержалось 44 % (по массе) рутилового концентрата, 24 % слюды, 15 % магнезита, 15 % ферромарганца, 2 % целлюлозы, железный порошок отсутствовал. В покрытиях электродов серии В и С массовое содержание железного порошка составляло соответственно 30 и 60 % при пропорциональном изменении остальных составляющих, кроме целлюлозы. Валовые выделения ТССА оценивали по методике, основанной на принципе полной фильтрации образующегося аэрозоля. Сварка выполнялась переменным током. Режим сварки, характеристика валовых выделений ТССА и ее содержание представлены в табл. 42.

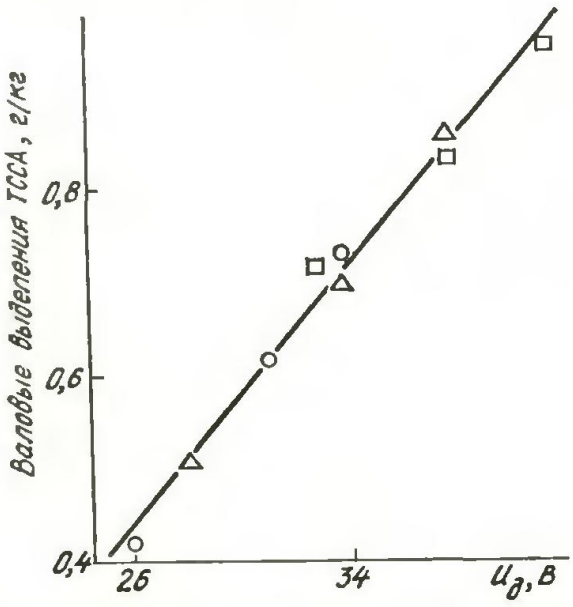


Рис. 149. Зависимость валовых выделений ТССА от номинального напряжения на дуге.

Установлено, что увеличение толщины электродного покрытия при неизменном его составе приводит к росту валовых выделений ТССА. При этом содержание в ней марганца и кремния практически не изменяется, а содержание железа несколько снижается. Увеличение в покрытии количества железного порошка вызывает снижение валовых выделений ТССА и концентрации в ее составе марганца и кремния. Как видно из рис. 149, изменения валовых выделений ТССА тесно связаны с изменениями энергии дугового разряда (напряжения дуги). Независимо от толщины и состава покрытия более высокой мощности дуги соответствуют более высокие показатели валовых выделений ТССА, что обусловлено увеличением интенсивности плавления электродного материала.

Для анализа полученных результатов, характеризующих изменение состава аэрозоля, рассмотрены расчетные данные о массовой скорости плавления различных составляющих электрода и их поступления в аэрозоль. Оценены скорости плавления электродного покрытия, стержня, железного порошка, марганца и диоксида кремния для экспериментальных электродов, скорости поступления железа, марганца и кремния (или их соединений) в ТССА. Установлено, что увеличение толщины покрытия каждой серии электродов приводит к повышению напряжения дуги, что вызывает увеличение скорости плавления как электродного покрытия в целом, так и отдельных его составляющих. В связи с этим возрастает

и количество испаряющегося в единицу времени материала, т. е. валовые выделения ТССА. Однако расчеты показывают, что рост валовых выделений ТССА не пропорционален увеличению скорости плавления электродного покрытия и отдельных его составляющих. С ростом толщины доля составляющих покрытия, перешедших из расплава в аэрозоль, снижается (табл. 43). Исключение составляет железо. Полученные зависимости можно объяснить, по нашему мнению, влиянием толщины покрытия на характер плавления и переноса электродного материала. Как показала скоростная киносъемка, с увеличением толщины электродного покрытия возрастает количество капель металла и шлака, попадающих в ванну с периферийных участков электрода (рис. 150). Эти капли металла и шлака не перегреты до столь высоких температур, как основная капля, формирующаяся на торце электрода. Поэтому процессы испарения с поверхности периферийных капель идут менее интенсивно.

Увеличение содержания железного порошка в покрытии осуществлялось пропорциональным уменьшением доли остальных составляющих. При прочих равных условиях это приводило к снижению номинального напряжения дуги (т. е. ее мощности). Оба фактора обусловливали снижение массовой скорости расплавления содержащихся в электродном покрытии марганца и диоксида кремния, а следовательно, и уменьшение испаряющегося в единицу времени количества этих материалов.

Таблица 43. **Влияние толщины электродного покрытия и содержания в нем железного порошка на массовый состав ТССА**

Покрытие	Толщина, мм	Fe	Mn	SiO_2
А-1	6,2	0,7	4,5	5,3
А-2	8,0	0,7	2,5	3,2
А-3	9,4	0,7	2,1	2,8
В-1	6,2	0,5	3,3	3,3
В-2	8,0	0,5	2,7	2,4
В-3	9,4	0,5	2,3	1,8
С-1	6,2	0,4	2,8	2,3
С-2	8,0	0,4	2,4	2,1
С-3	9,4	0,4	2,4	1,3

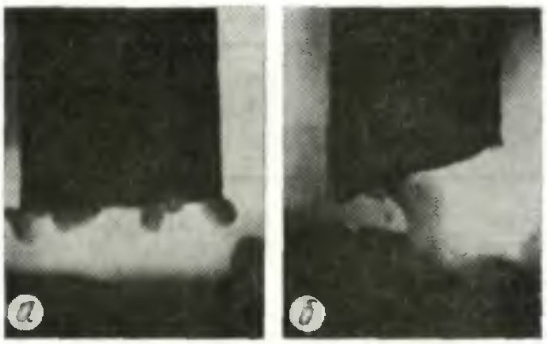


Рис. 150. Характер переноса электродного материала при сварке высокопроизводительными толстопокрытыми электродами (*а*) и электродами с тонким покрытием (*б*).

Полученные данные о содержании железа в ТССА можно объяснить особенностями плавления присадочного металла (стержень и железный порошок) при сварке опытными электродами каждой серии. Расчеты показывают, что увеличение толщины покрытия практически не оказывает влияния на скорость плавления электродного стержня. По-видимому, повышение мощности дуги, связанное с увеличением толщины электродного покрытия, вызвано падением напряжения в столбе дуги, обусловленным увеличением размеров «чехла» электродного покрытия (т. е. удлинением дуги), а энергия, выделяемая в приэлектродных областях, практически не изменяется. Вследствие этого скорость плавления электродного стержня изменяется незначительно. При сварке электродами серии А это приводит к тому, что поступление железа в ТССА независимо от толщины электродного покрытия остается практически неизменным, так как основным источником испарения железа является расплавленный металл на стадии капли.

С увеличением содержания железного порошка в покрытии (электроды серий В и С) скорость плавления электродного стержня снижается вследствие падения номинального напряжения дуги. Это является причиной уменьшения интенсивности испарения железа и поступления его в сварочный аэрозоль, несмотря на то что суммарная скорость плавления присадочного железа (стержень + железный порошок) возрастает. Вероятно, это связано с периферийным переносом расплавленных частиц железа, температура перегрева которых незначительна по

Таблица 44. **Состав покрытий электродов серии Ал**

Составляющая	Базовый состав Б	Серия А			Серия С			Серия К			Серия Н		
		Ал-1	Ал-2	Ал-3	Си-1	Си-2	Си-3	К-1	К-2	К-3	Н-1	Н-2	Н-3
Мрамор	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Флюорит	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Слюда	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ферромарганец	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ферросилиций	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Ферротитан	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Железный порошок	30	25	20	15	25	20	10	28	26	22	28	26	22
Глинозем	—	5	10	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Кварцевый песок	—	—	—	—	5	10	20	—	—	—	—	—	—
Поташ	—	—	—	—	—	—	—	2	4	8	—	—	—
Сода	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	8

Примечание. Диаметры электродов $d_э = 4$ мм, диаметр покрытия 6,2 мм, связующее — натриевое жидкое стекло.

Таблица 45. **Валовые выделения и химический состав ТССА электродов серии Ал**

Электрод	Валовые выделения ТССА		Mn	Si	K	Na	Ca	Al	F	Fe
	г/кг электродов	г/мин								
Б	19,4	0,80	4,1	1,9	5,2	14,0	15,0	0,38	16,9	23,2
Ал-1	18,4	0,75	3,6	1,6	3,0	11,8	10,8	0,59	16,8	22,8
Ал-2	20,0	0,75	3,8	1,8	2,9	10,7	11,1	0,99	19,3	28,1
Ал-3	20,7	0,82	3,7	1,9	3,0	10,5	10,5	1,53	21,0	30,6

Примечание. В каждом эксперименте $I_{св} = 190...200$ А, $U_д = 23...25$ В.

Таблица 46. **Валовые выделения и химический состав ТССА электродов серии Си, % (по массе)**

Электрод	Валовые выделения ТССА		Mn	Si	K	Na	Ca	Al	F	Fe
	г/кг электрода	г/мин								
Б	19,4	0,80	4,1	1,9	3,2	14,0	15,0	0,33	16,9	23,2
Си-1	17,6	0,75	4,5	2,0	3,7	12,6	13,4	0,30	17,4	26,1
Си-2	18,6	0,78	4,1	2,9	3,7	11,9	12,9	0,42	19,5	25,3
Си-3	17,3	0,73	4,2	4,4	3,3	10,6	12,3	0,49	19,4	26,6

Примечание. В каждом эксперименте $I_{св} = 190...200$ А, $U_д = 24...25$ В.

сравнению с каплей металла, формирующейся на торце электрода.

Следует отметить, что при прочих равных условиях введение железного порошка в покрытие приводит к снижению удельных выделений ТССА в расчете на единицу массы наплавленного металла (см. табл. 42).

Составы покрытий основного вида, как и составы рутиловых покрытий, могут иметь существенные различия. Поэтому промышленные марки электродов с покрытиями основного вида разных стран и фирм различаются по показателям валовых выделений и составу ТССА. При сварке этими электродами в сварочный аэрозоль попадают опасные для здоровья фтористые соединения, причем количест-

Таблица 47. **Валовые выделения и химический состав ТССА электродов серии К, % (по массе)**

Электрод	Валовые выделения ТССА		Mn	Si	K	Na	Ca	Al	F	Fe
	г/кг электрода	г/мин								
Б	19,4	0,80	4,1	1,9	5,2	14,0	15,0	0,33	16,9	23,2
К-1	18,4	0,80	3,6	1,5	12,0	12,7	11,6	0,35	18,1	18,1
К-2	16,4	0,73	3,3	1,4	13,8	11,8	10,7	0,27	17,9	18,3
К-3	24,8	1,05	2,6	1,2	19,6	9,4	9,6	0,20	17,1	20,3

Примечание. В каждом эксперименте $I_{св} = 190...200$ А, $U_д = 24..25$ В.

Таблица 48. **Валовые выделения и химический состав ТССА электродов серии Н, % (по массе)**

Электрод	Валовые выделения ТССА		Mn	Si	K	Na	Ca	Al	F	Fe
	г/кг электрода	г/мин								
Б	19,4	0,80	4,1	1,9	5,2	14,0	15,0	0,33	16,9	23,2
Н-1	21,1	0,84	3,6	1,4	4,9	17,8	12,1	0,35	20,3	25,1
Н-2	22,2	0,91	3,3	1,4	4,2	20,7	11,5	0,28	21,3	21,8
Н-3	28,7	1,20	3,0	1,4	3,1	19,5	9,0	0,20	18,8	27,8

Примечание. В каждом эксперименте $I_{св} = 190...200$ А, $U_д = 24...25$ В.

во их в ТССА может существенно изменяться в зависимости от состава покрытия. Оценивалось влияние составляющих основного покрытия, способных образовывать летучие фториды (калия, натрия, алюминия и кремния), на валовые выделения и химический состав ТССА. С этой целью в состав покрытий опытных электродов вводили различное содержание соединений калия, натрия, кремния и алюминия (табл. 44). В процессе экспериментов определялись валовые выделения и химический состав ТССА. Сварка выполнялась постоянным током обратной полярности. Состав ТССА определялся рентгенофлуоресцентным анализом.

Результаты испытаний электродов серии Ал представлены в табл. 45. Видно, что введение оксидов алюминия в состав покрытия основного вида не оказывает существенного влияния на валовые выделения ТССА, однако приводит к заметному увеличению в сварочном аэрозоле фтора. По-видимому, оно связано с образованием летучих фторидов алюминия, поскольку наряду с фтором наблюдается одновременное увеличение в составе ТССА содержания алюминия.

Результаты испытаний электродов серии Cu представлены в табл. 46. Видно, что увеличение содержания кремнезема в покрытии электродов не влияет на валовые выделения ТССА, при этом мало изменяется и ее химический состав. Наблюдается незначительное увеличение содержания кремния и некоторое снижение кальция и натрия, что, вероятно, обусловлено снижением основности образующегося шлака, которая, как показано выше, оказывает существенное влияние на интенсивность испарения соединений щелочных и щелочноземельных металлов.

Введение поташа в количестве более 4 % в покрытие электродов привело к заметному увеличению валовых выделений ТССА (табл. 47). Как свидетельствуют экспериментальные данные, оно обусловлено интенсивным выделением в состав аэрозоля соединений калия. При этом в составе аэрозоля снижается содержание натрия и кальция. Аналогично поташу на валовые выделения ТССА оказывает влияние и сода. С ростом содержания Na_2CO_3 в покрытии электродов растут валовые выделения ТССА, главным

образом благодаря удельным выделениям натрия и фтора (табл. 48). При этом удельные выделения кремния, марганца, кальция и калия практически не изменяются, а их количество в составе ТССА несколько снижается.

Подводя итоги полученным экспериментальным данным, необходимо отметить, что увеличение кремнезема в составе электродного покрытия основного вида практически не изменяет объема выделяемого аэрозоля. Введение оксидов алюминия в покрытие приводит к увеличению содержания фторидов в составе ТССА. Особенно осторожно необходимо использовать соединения калия и натрия в покрытиях основного вида, так как при содержании K_2CO_3, Na_2CO_3 свыше 5 % они вызывают значительное увеличение валовых выделений ТССА и рост содержания в зоне сварки фторидов натрия и калия.

Наряду с соединениями марганца и фтора, опасными для организма человека являются соединения шестивалентного хрома, особенно растворимые соединения. Они образуются главным образом при сварке нержавеющих сталей, когда присадочный (электродный) и основной металл содержат большое количество хрома. Установлено, что основным источником поступления соединений хрома в аэрозоль является электрод (стержень и покрытие, содержащие хром) [301]. Доля хрома, переходящего из электрода в аэрозоль, зависит от состава покрытия. Она больше при сварке электродами с рутиловым покрытием, чем при сварке электродами с основным покрытием. Отмечено, что большое влияние на содержание соединений хрома в аэрозоле, особенно растворимых соединений шестивалентного хрома, оказывает суммарное содержание в покрытии электродов оксидов щелочных металлов K_2O и Na_2O. Чем меньше этих оксидов в электродном покрытии, тем меньше соединений хрома в ТССА. Это объясняется тем, что растворимые соединения хрома представлены в ТССА в виде K_2CrO_4 и Na_2CrO_4. Снижение количества оксидов щелочных металлов, по-видимому, снижает возможности образования отмеченных выше хроматов калия и натрия в аэрозоле.

Подводя итоги результатов рассмотренных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Влияние состава электродного покрытия на показатели валовых выделений ТССА, как правило, проявляется, через его влияние на величину номинального напряжения дуги и окислительный потенциал атмосферы дуги. Чем они больше, тем интенсивнее идут процессы образования сварочного аэрозоля.

2. Материалы, выделяющие при нагревании и плавлении электродного покрытия большое количество многоатомных газов и паров (CO_2, H_2, H_2O и др.), обусловливающих сжатие столба дуги, способствуют повышению валовых выделений сварочного аэрозоля. Такими материалами являются органические добавки (целлюлоза, карбоксиметилцеллюлоза и др.), карбонаты, минералы с большим содержанием связанной влаги.

3. Химический состав ТССА зависит от содержания в покрытии и электродном стержне элементов и соединений, характеризующихся высокой упругостью давления паров (марганец, фтористые соединения, соединения щелочных металлов и др.) и от основности образующегося в результате плавления покрытия шлака.

Изменение основности шлака влияет на активность кислых или основных оксидов и тем самым обусловливает уменьшение или увеличение их содержания в составе аэрозоля. Наибольшее влияние основность шлака оказывает на интенсивность поступления в аэрозоль соединений щелочных и щелочноземельных металлов (K_2O, Na_2O, MgO, CaO).

4. Наиболее неблагоприятными показателями валовых выделений ТССА характеризуются электроды с покрытиями целлюлозного и основного видов.

8. Санитарно-гигиеническая оценка электродов

При сварке углеродистых и низколегированных сталей электродами с покрытиями рутилового, кислого, ильменитового, целлюлозного видов основной токсичный компонент ТССА — марганец, а при использовании электродов с покрытием основного вида — соединения фто-

ра. При сварке сталей, покрытых антикоррозионным слоем цинка, в составе аэрозоля присутствуют токсичные соединения цинка. В процессе сварки легированных, в том числе нержавеющих, сталей в составе ТССА, помимо токсичных соединений марганца и фтора, имеются токсичные соединения хрома и никеля. Основными токсичными компонентами ТССА, образующимися в процессе сварки цветных металлов (алюминия, меди и др.), являются их оксиды.

Одновременно с ТССА на электросварщиков воздействуют газообразные токсичные вещества, которые образуются при плавлении электрода и в дуговом разряде. Компонентами ГССА, образующейся при сварке покрытыми электродами, являются озон, оксиды азота, оксид углерода. При сварке электродами с покрытиями основного вида в составе ГССА присутствуют фтористый водород, тетрафторид кремния и другие фториды, являющиеся токсичными газами. Поступая в окружающую воздушную среду, эти вредные вещества могут загрязнять ее до уровня, превышающего предельно допустимые концентрации (ПДК).

При длительном поступлении в организм сварочный аэрозоль может привести к развитию интоксикаций и других патологических явлений. Факторы профессионального риска сварщиков возрастают при увеличении интенсивности выделения аэрозоля и повышении его токсичности.

Все методы санитарно-гигиенической оценки электродов основаны на принципе улавливания и определения количества и состава ТССА и ГССА, выделяющихся при сварке. Установлено, что при сварке покрытыми электродами опасные для живого организма газы выделяются в незначительных количествах. Это главным образом газообразные фториды. Как отмечалось выше, в отечественной и зарубежной практике чаще всего используются следующие санитарно-гигиенические показатели электродов: удельное выделение ТССА D, образующейся при расплавлении 1 кг электродов (г/кг или мг/кг), и интенсивность выделения ТССА G, т. е. количество ТССА, выделяющейся при расплавлении электрода за единицу времени (г/ч или г/мин). Кроме того, иногда используют величину удельного выделения ТССА $D_{н.м}$ в расчете на 1 кг наплавленного металла (г/кг).

Поскольку токсичность сварочного аэрозоля определяется главным образом его химическим составом, рассмотренные выше показатели не могут в полной мере характеризовать санитарно-гигиенические свойства электродов и позволяют сопоставлять между собой лишь электроды, близкие по составу покрытия, если они используются примерно в идентичных условиях.

Для сравнения и классификации электродов по токсичности образующихся сварочных аэрозолей Международный институт сварки рекомендует использовать наряду с показателем G еще два показателя [280, 235]. Показатель TLV_f (Threshold Limit values of the fume — предельно допускаемая концентрация аэрозоля) характеризует предельно допустимую концентрацию ТССА данного состава, которая рассчитывается с учетом токсичности входящих в ее состав элементов и соединений:

$$TLV_f = \frac{100}{\frac{C_1}{TLV_1} + \frac{C_2}{TLV_2} + \cdots + \frac{C_i}{TLV_i}}, \qquad (3.79)$$

где C_1, C_2, C_i — процентное содержание элементов 1, 2, ..., i в ТССА; TLV_1, TLV_2, TLV_i — предельно допустимые концентрации этих элементов в воздухе рабочей зоны, мг/м³.

Для классификации электродов по показателю TLV_f рекомендуется применять ряд величин: 0,5—1—1,5—2—2,5—3—3,5—4—4,5 мг/м³. Получаемая в результате расчета величина TLV_f округляется до ближайшей величины предлагаемого ряда классификации. Показатель NHL (Nominal Hygienic Air Requirement — номинальные гигиенические требования к воздухообмену) учитывает количество выделяющегося при сварке аэрозоля и токсичность его составляющих, определяется расчетным путем из уравнения

$$NHL =$$

$$= 10G\left(\frac{C_1}{\mathrm{TLV}_1} + \frac{C_2}{\mathrm{TLV}_2} + \cdots + \frac{C_i}{\mathrm{TLV}_i}\right). \quad (3.80)$$

Физический смысл показателя NHL — количество чистого воздуха, подаваемого в зону сварки в единицу времени (м³/ч), необходимого для разбавления концентрации в воздухе аэрозоля до уровня ниже предельно допустимого, т. е. до уровня TLV_f.

Зная интенсивность выделения ТССА и показатель TLV_f, легко определить показатель NHL из уравнения

$$\mathrm{NHL} = G/\mathrm{TLV}_f. \quad (3.81)$$

Показатель NHL — величина теоретическая, которая используется только для классификации электродов и интенсивность воздухообмена в рабочем помещении не определяет.

В зависимости от величины NHL электроды могут быть отнесены к одному из семи классов:

NHL, м³/ч	Класс
До 3000	1
3000—7500	2
7500—15 000	3
15 000—35 000	4
35 000—60 000	5
60 000—100 000	6
Более 100 000	7

Поскольку показатель NHL зависит от интенсивности выделения ТССА, т. е. в конечном счете от диаметра электрода и режима сварки, то электроды разного диаметра могут принадлежать к различным санитарно-гигиеническим классам по предлагаемой выше классификации.

Санитарно-гигиенические показатели электродов TLV_f и NHL учитывают не только количество образующегося при сварке аэрозоля, но и его химический состав и поэтому позволяют сопоставлять по уровню токсичности аэрозоля электроды с различным типом покрытия.

Предложенная Международным институтом сварки классификация электродов по уровню токсичности сварочного аэрозоля принята рядом скандинавских стран [312, 313, 280], однако она не получила всеобщего признания. В значительной мере это обусловлено тем, что уровни ПДК различных элементов и соединений (TLV_f), которые входят в уравнения (3.81) и (3.82), в разных странах существенно отличаются друг от друга. Поэтому при одинаковом химическом составе и объемах выделения ТССА один и тот же электрод может быть отнесен к различным классам в зависимости от величины установленных в каждой стране уровней ПДК элементов, входящих в состав ТССА.

Необходимо отметить также, что в расчетах санитарно-гигиенических показателей электродов TLV_f и NHL используются предельно допустимые концентрации ТССА, установленные для элементов или простых соединений (например, оксидов). В реальных же условиях сварки частицы сварочного аэрозоля состоят из сложных соединений, воздействие которых на организм существенно отличается от воздействия простых элементов и соединений. Комбинированное воздействие на организм группы элементов или сложных соединений может ослаблять или усиливать воздействие наиболее токсичных составляющих аэрозоля. Поэтому следует учесть, что использование в расчетах санитарно-гигиенических показателей величин ПДК, установленных для отдельных элементов, а не для реальных соединений сложного состава, не дает достаточно объективной оценки уровня токсичности ТССА.

Определение интенсивности и удельного выделения ТССА осуществляется гравиметрическим методом. ТССА осаждается на фильтры при условии полной фильтрации отсасываемого из зоны сварки воздуха с аэрозолем. Сварка осуществляется в специальной камере, из которой через фильтр откачивается весь образующийся в процессе сварки аэрозоль. На рис. 151 показана схема установки для определения интенсивности и удельного выделения ТССА, применяемой ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР. Установка состоит из камеры, в которой производится сварка, фильтра и пылесоса для отсасывания через фильтр всего образующегося в процессе сварки аэрозоля. В качестве фильтра используется ткань ФПП-15 (ткань Петрянова), способная задерживать мельчайшие частицы сварочного аэрозоля. Фильтр имеет форму

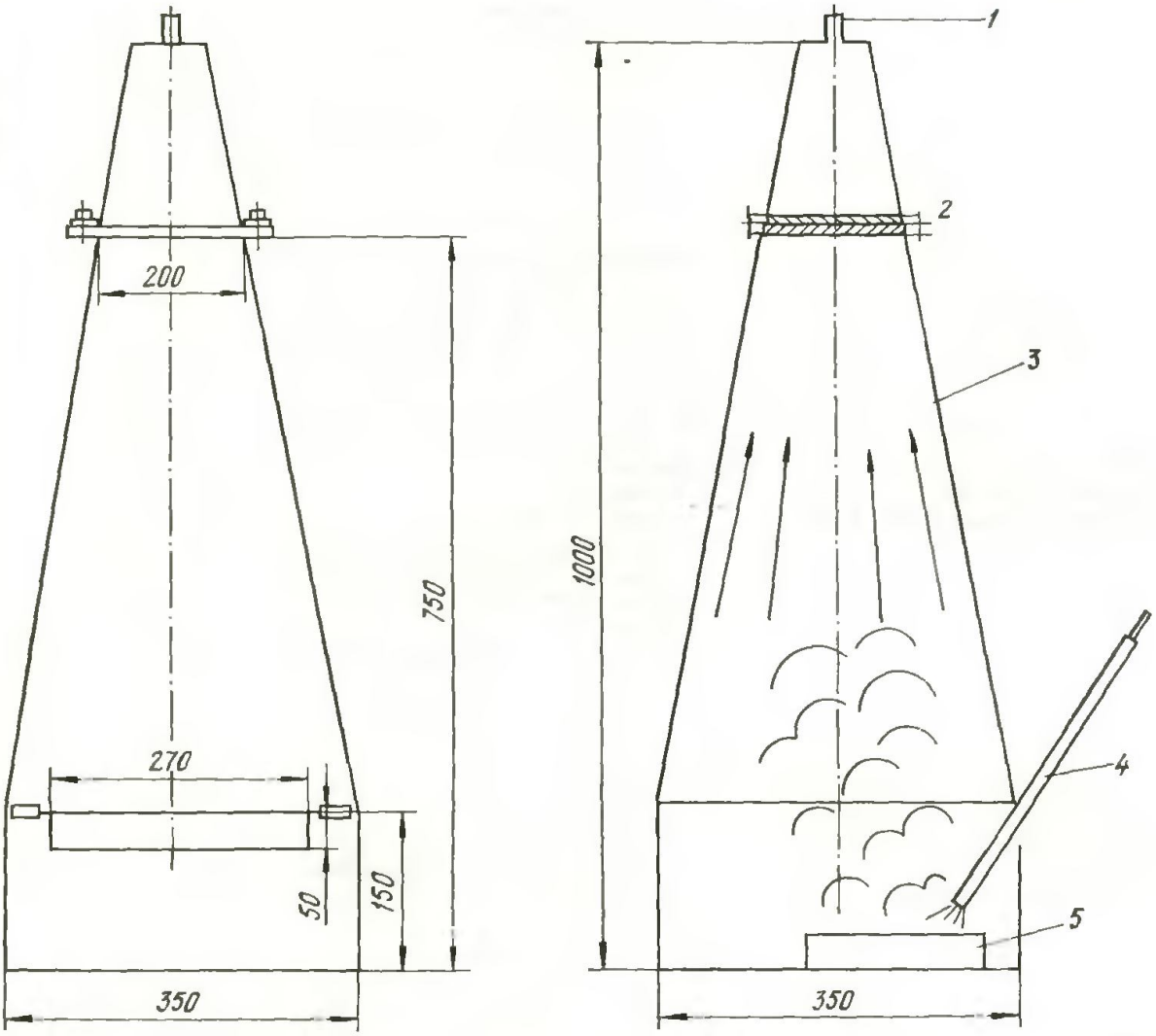


Рис. 151. Схема установки для определения валовых выделений ТССА:
1 — отсос воздуха; *2* — фильтр; *3* — камера; *4* — электрод; *5* — пластина для сварки.

квадрата размеров 240 × 240 мм. Для отсасывания сварочного аэрозоля использован пылесос.

Электрод перед сваркой подвергается сушке в соответствии с рекомендациями нормативно-технической документации. Сварка выполняется в нижнем положении, как правило, на максимально допускаемом для данного положения токе. Для сварки используется пластина металла из стали Ст3 толщиной 14—16 мм, длиной 200—250 мм, шириной 60—80 мм. Поверхность пластины очищается от окалины, ржавчины, других загрязнений. Угол наклона электрода к горизонтали в процессе сварки составляет 70—75°, что обеспечивается щелевым зазором в передней стенке камеры, через который электрод вставляется в камеру. Фильтр и электрод взвешиваются до начала сварки и после сварки. Время сварки фиксируется секундомером. Измерение повторяют три раза при одних и тех же условиях, результат находится как среднеарифметическая величина.

Интенсивность выделения ТССА (г/мин)

$$G = \frac{m_2 - m_1}{t_{св}} \cdot 60, \qquad (3.82)$$

где m_1, m_2 — масса фильтра соответственно до осаждения на нем ТССА и после осаждения на нем ТССА, г.

Удельное выделение ТССА (г/кг)

$$D = (m_2 - m_1)/(P_2 - P_1), \qquad (3.83)$$

где P_1, P_2 — масса электрода соответственно до и после сварки, г.

Аналогичные методики определения интенсивности и удельного выделения

Таблица 49. **Методы исследования сварочного аэрозоля [262]**

Метод	Характер получаемой информации	Характеристика метода	
		Разрушающий (Р) или неразрушающий (НР)	Количественный (К) или полуколичественный (ПК)
Химический анализ:	Элементарный анализ, включая Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cr, Pb, Mn, Al, Ba	Р	К
атомно-абсорбционная спектрометрия	То же, включая Na, Ca, K, Li	Р	К
эмиссионная спектрометрия	То же, включая Fe, Cu, Zn, Al Cr^{6+}	Р	К
цветовой	То же, металлов и ионов, включая Ca^{2+}, F^-, Cl^-	Р	К
использование ион-селективного электрода	Анализ Si	Р	К
гравиметрический	То же, кислорода	Р	К
плавление в инертном газе	То же, элементов, начиная с атомного номера более 9 периодической системы элементов Менделеева	НР	К
Рентгеновский флуоресцентный анализ	Структура ТССА (Fe_3O_4, NaF, CaF_2 и др.	НР	ПК
Метод рентгеновской дифракции	Размер частиц, полуколичественный анализ единичных частиц	НР	ПК
Метод сканирующей электронной микроскопии	Элементный анализ, изучение химической структуры	НР	К
Рентгеноспектральный анализ с использованием заряженных частиц (с протонным возбуждением)	Изучение химической структуры, исследование поверхности частиц	НР	ПК
Метод электронной спектроскопии (рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии)			

ТССА применяются во многих странах. Наиболее широкое распространение получила конструкция установки, разработанная в Швеции [284].

Для улучшения санитарно-гигиенических показателей электродов необходимо знать природу биологического действия сварочных аэрозолей на живой организм. Биологическая активность аэрозоля зависит от элементного состава ТССА, его структуры, типа химической связи элементов и кристаллической решетки соединений, входящих в состав ТССА. Для исследования ТССА применяются различные химические и физические методы (табл. 49).

Химический (элементный) состав ТССА определяется преимущественно путем рентгеновского флуоресцентного анализа. С помощью этого метода устанавливается содержание Fe, Mn, Cr, Ti, Ca, K, Si, Al, Mg, Na, F. Предел обнаружения Fe, Mn, Cr, Ti, Ca, K в анализируемом образце составляет 0,05 %, Si, Al, Mg — 0,1 %, Na, F — 0,2 %. Для определения химического состава ТССА отбираются пробы ТССА на фильтры из ацетилцеллюлозы. Для этого вместо большого фильтра, который применяется для определения валовых выделений ТССА, в верхнюю часть камеры, в которой происходит сварка, вставляется специальная кассета с шестью фильтрами АФА-В-10 с рабочей площадью 10 $см^2$. В одном сварочном эксперименте отбирается десять параллельных проб. В зависимости от интенсивности образования аэрозоля изменением длительности отбора добиваются осаждения на фильтре пробы ТССА в пределах 10—30 мг.

Отобранные пробы анализируются на рентгеновском спектрометре. Для рентгеновского флуоресцентного анализа ТССА могут быть использованы рентгеновские многоканальные спектрометры, работающие в комплексе с ЭВМ как отечественного — СРМ-18 с ЭВМ типа «Электроника», так и зарубежного — ARL-7200 с

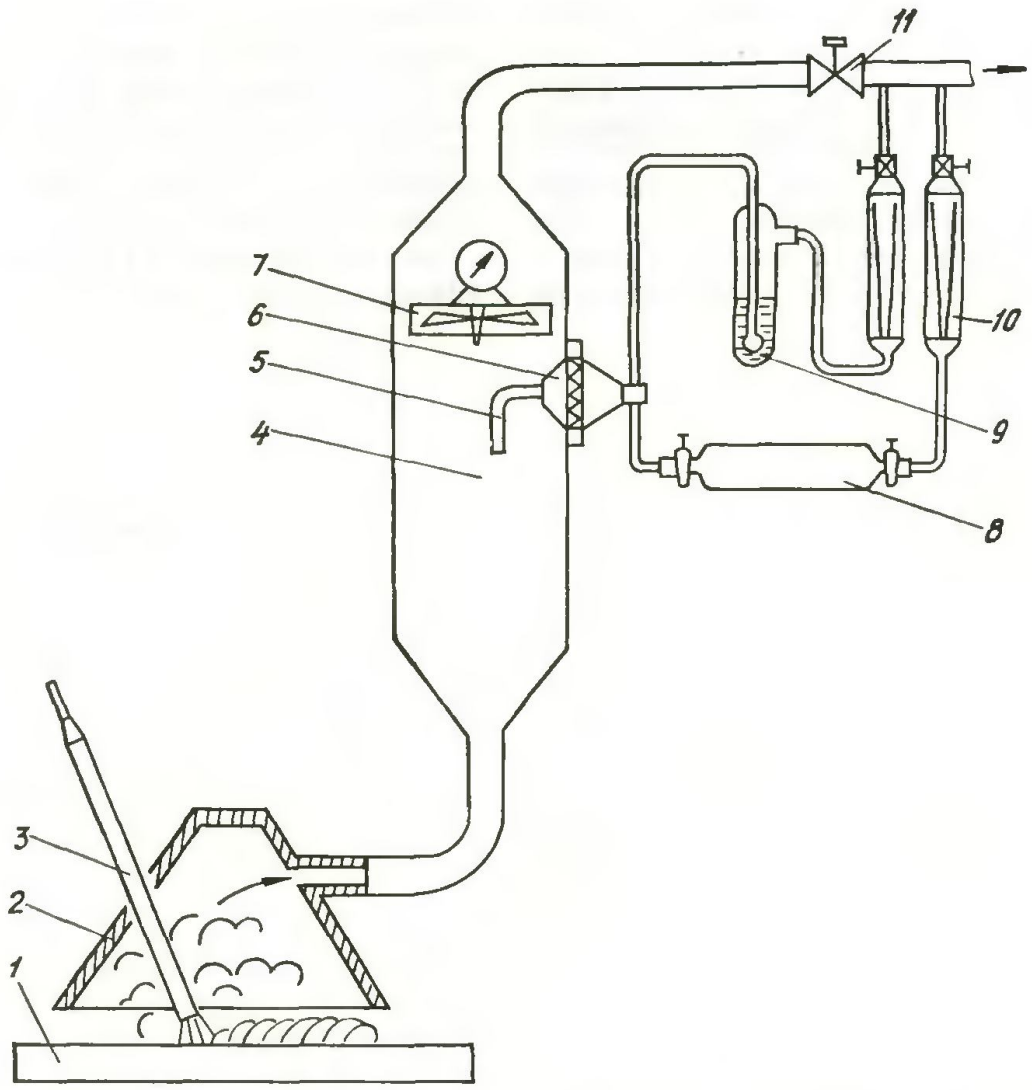


Рис. 152. Схема установки для отбора проб газообразных составляющих сварочного аэрозоля:

1 — стальная пластина; *2* — заборное сопло; *3* — электрод; *4* — измерительно-разделительная камера; *5* — заборная трубка; *6* — фильтр; *7* — анемометр; *8* — сосуд для отбора проб газа; *9* — поглотительный прибор; *10* — ротаметрические расходомеры; *11* — регулятор расхода газа.

ЭВМ типа PDP 11/05 (США) или PW-1600 (Нидерланды) производства

Пробы ГССА для анализа отбираются при непрерывном заборе части запыленного потока из потока воздуха, удаляющего весь сварочный аэрозоль из зоны сварки. Установка для отбора проб ГССА состоит из заборной и измерительно-разделительной камер, поглотительных приборов и сосудов для отбора газа, расходомеров, регуляторов расхода газа и побудителя тяги (рис. 152).

Отбор части запыленного газового потока из измерительно-разделительной камеры осуществляется через заборную трубку с соблюдением равенства скоростей газовых потоков в заборной трубке и разделительной камере (изокинетический принцип отбора пробы). Средняя скорость потока в разделительной камере измеряется с помощью анемометра.

Очистка газов от ТССА проводится с использованием фильтра АФА-В-18 с рабочей площадью 18 см^2. Фильтр закреплен в патроне, непосредственно присоединенном к заборной трубке. Газы, прошедшие через фильтр, разделяются на два потока, один из которых пропускается через барботеры для поглощения газов в жидких сорбентах, второй используется для заполнения емкостей при определении содержания ГССА физическими методами анализа. Применение принципа двойного разделения газового потока позволяет увеличить скорость прохожде-

ния газа через фильтр и снизить поглощение фтористых газов твердыми частицами аэрозоля.

Ход эксперимента по определению интенсивности образования газов состоит в выполнении следующих операций: предварительная настройка режима сварки, установка расхода воздуха в измерительно-разделительной камере через заборную трубку; наплавка валика на пластину и отсос выделяющегося при сварке аэрозоля; отбор из запыленного газового потока его части и фильтрование отобранного потока от твердых частиц аэрозоля; поглощение газов в жидких сорбентах; анализ отобранных проб.

Химический состав ГССА определяется аналитическими методами [138].

Глава четвертая

ПЛАВЛЕНИЕ И ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

1. Кинетика плавления покрытых электродов

Характер капельного плавления и переноса электродного металла оказывает большое влияние на условия взаимодействия металла с окружающей средой (продолжительность и поверхность контакта) и на технологические характеристики процесса сварки (устойчивость горения дуги, потери металла, формирование шва и т. д.).

Исследованию плавления и переноса металла при дуговой сварке посвящены работы В. И. Дятлова, А. А. Ерохина, А. Г. Мазеля, И. К. Походни, И. И. Зарубы, А. Г. Потапьевского, Т. Иошиды, Д. Рефельда, Ф. Эрдмана-Еснитцера и других советских и зарубежных ученых [49, 104, 50, 148, 45, 63, 146, 299, 322, 247, 296].

На рис. 153 представлены результаты обработки кинограмм процесса сварки голой проволокой марки Св-08А диаметром 5 мм. Видно, что масса капли на торце электрода колеблется около некоторого среднего значения, подчиняясь законам случайных величин. Обработка данных А. А. Ерохина [49, 50] и А. Г. Мазеля (рис. 154, 155), полученных при сварке голыми и тонкопокрытыми электродами, позволяет сделать вывод, что средняя скорость роста капель для конкретных условий сварки практически постоянна.

Наличие на стержне многокомпонентного покрытия нормальной или повышенной толщины существенно изменяет характер плавления и переноса электродного металла. В связи с этим предприняты исследования кинетики плавления покрытых электродов.

Условия экспериментов. Для исследования были выбраны электроды УОНИ-13/45 и АНО-4, резко отличающиеся по составу и характеру переноса металла, диаметр стержней 8 мм, $K_{м.п} = 35$ %, материал стержней проволока Св-08А. Температура прокалки электродов УОНИ-13/45 — 623 К, электродов АНО-4 — 473 К. Наплавка выполнялась на торец пластины из стали Ст3 толщиной 30 мм, $I_{св} = 220...250$ А, $U_д = 22...36$ В, $v_{св} = 9$ м/ч.

Плавление электрода, рост капли, ее отрыв и перенос через дуговой промежуток изучали с помощью скоростной рентгенокиносъемки. Режим сварки для каждого опыта определяли при статистической обработке осциллограмм. Количество жидкого металла на торце электрода определяли путем применения специальных электродов (рис. 156). Ширина разреза в стержне составляла 0,8 мм. Базой отсчета служили предварительно нанесенные на покрытие надрезы. О приращении массы капли на электроде судили по длине оплавившейся части электродного стержня, а в некоторых опытах — по силуэту капли на кинопленке. Плотность жидкого металла принималась равной 7 г/см^3. Для уточнения положения границы твердого и жидкого металла использовали точки B и C, лежащие на образующих цилиндрической поверхности электродного стержня (рис. 156). Граница твердого и жидкого металла во всех случаях считалась плоской. Вос-

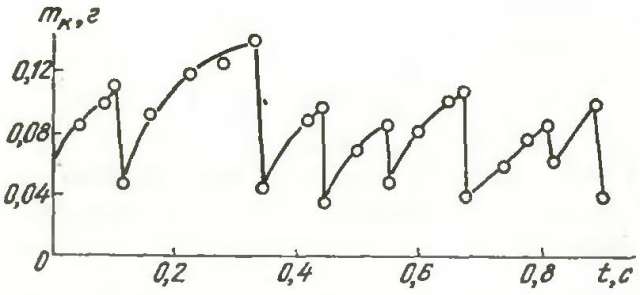
производимость результатов расчета массы капли обоими методами вполне удовлетворительная.

Исследования показали, что прорезь в стержне не оказывает существенного влияния на массу переходящих капель $m_п^{ср}$ и время между переходами $\tau_к$.

При сварке электродами с нормальной толщиной покрытия и при обычных плотностях тока (4—14 А/мм²) металл переносится каплями различных размеров.

У электродов с основным покрытием на обратной полярности металл переносится крупными каплями, отношение $\xi = m_п/m_к$ обычно составляет 0,4 — 0,8. В случае сварки короткой дугой жидкий металл часто перетекает с электрода в сварочную ванну, не образуя отдельных капель. Лишь при удлинении дуги происходит капельный перенос без коротких замыканий.

На торце электрода с рутиловым и рудно-кислым покрытием непрерывно висит капля жидкого металла, от которой через определенные промежутки времени отрываются частицы металла. При малых то-



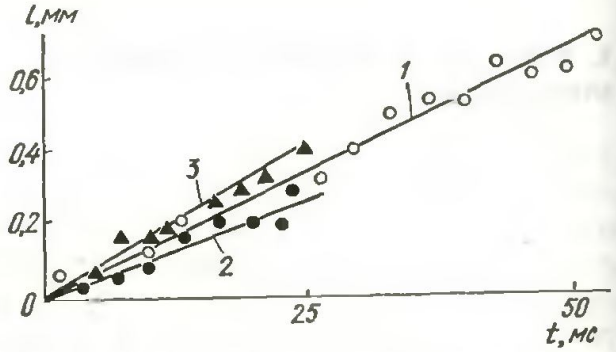


Рис. 153. Изменение массы капли на торце электрода во времени при сварке голыми стержнями из проволоки Св-08А диаметром 5 мм [50].

Рис. 154. Перемещение границы капля — стержень трех последовательно образовавшихся капель при сварке проволокой Св-08А диаметром 4 мм (обратная полярность, $I_{св} = 200$ А):
1 — первая капля; *2* — вторая капля; *3* — третья капля [104]

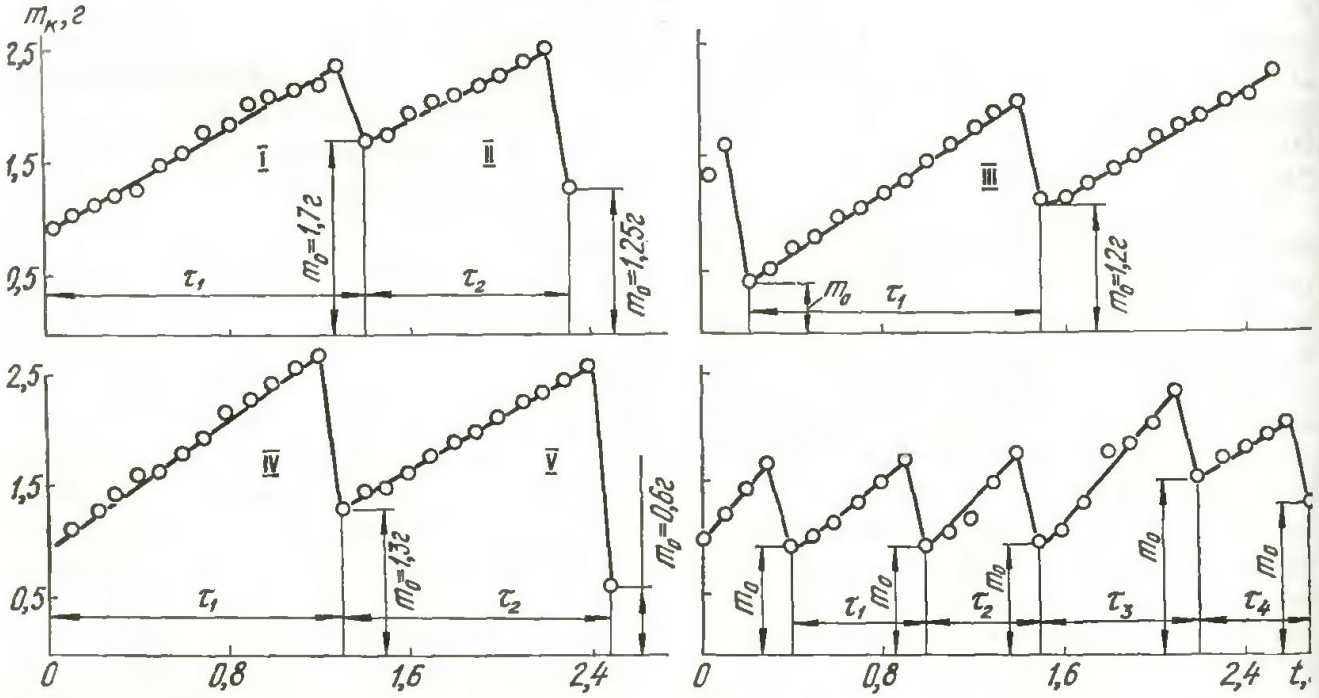


Рис. 155. Изменение массы капли на торце электрода во времени при сварке электродами УОНИ-13/45, $d_э = 8$ мм (обратная полярность) [148]:
I — $I_{св}$ — 255 А, $U_д$ = 24 В; *II* — $I_{св}$ = 288 А, $U_д$ = 21,4 В; *III* — $I_{св}$ = 323 А, $U_д$ = 29,1, В; *IV* — $I_{св}$ = 319 А, $U_д$ = 25,5 В; *V* — $I_{св}$ = 313 А, $U_д$ = 26,4 В.

ках масса отрывающихся частиц $m_п$ достаточно велика и соизмерима с массой капли на торце электрода $m_к$. При увеличении тока величина $m_п$ резко уменьшается. Размеры отрывающихся частиц значительно меньше длины дугового промежутка, и при нормальных плотностях тока перенос металла, как правило, не сопровождается короткими замыканиями. Под действием электромагнитных сил капля вытягивается по направлению сварочной ванны. Величину $m_к$ можно приближенно подсчитать по эмпирической формуле

$$m_к = k\frac{\pi d_э^3}{4}\rho_э. \qquad (4.1)$$

По данным опытов, коэффициент k для электродов с основным покрытием при сварке на обратной полярности $k = 0{,}6...1{,}1$, для электродов с рутиловым покрытием $k = 0{,}4...0{,}5$.

Мгновенная скорость плавления. Опыты проводились в широком диапазоне режимов сварки. Типичные зависимости изменения массы капли на торце электрода во времени приведены на рис. 155, а кинетика движения границы плавления — на рис. 157 и 158. Зависимость мгновенной скорости плавления стержня от тока на определенном участке электрода, как и при сварке голой проволокой, сохраняется линейной. Скорость плавления стержня для данного покрытия практически не зависит от напряжения дуги при постоянном токе (рис. 159). Напряжение дуги в данной серии опытов регулировалось изменением длины дуги.

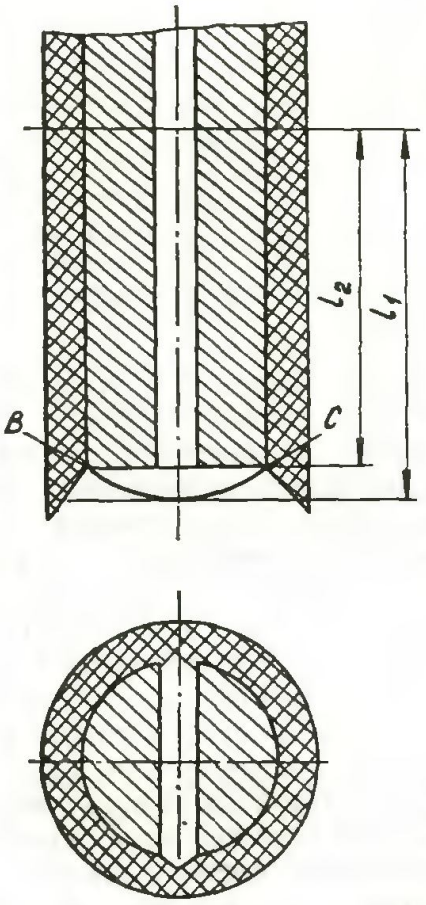
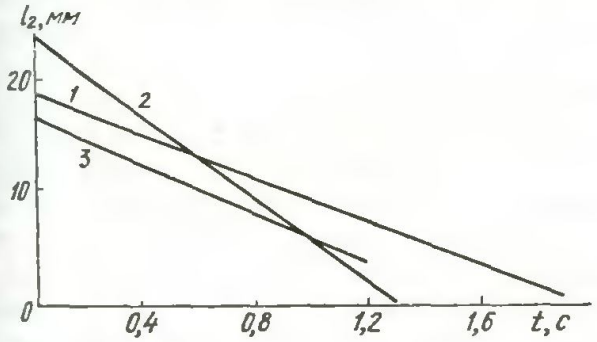


Рис. 156. Конструкция электрода, применявшегося для исследования плавления и переноса электродного металла.

При установившемся процессе сварки с мелкокапельным переносом металла ($\xi = 0{,}1$ и менее) условия передачи тепла дуги стержню практически неизменны и скорость плавления стержня при задан-



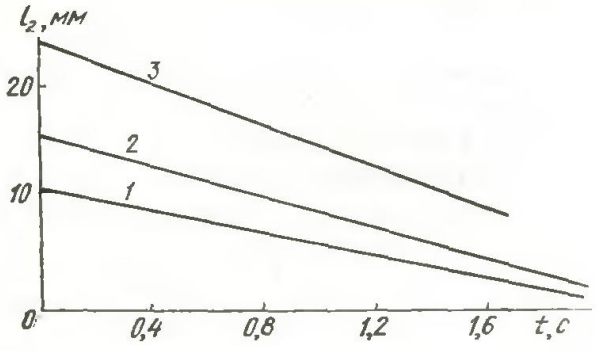


Рис. 157. Кинетика движения границы плавления электродов УОНИ-13/45, $d_э = 8$ мм (прямая полярность):
1 — $I_{св} = 280$ А: $U_д = 31$ В; *2* — $I_{св} = 410$ А, $U_д = 35$ В; *3* — $I_{св} = 290$ А, $U_д = 28$ В [148].

Рис. 158. Кинетика движения границы плавления электродов АНО-4 диаметром 8 мм (прямая полярность):
1 — $I_{св} = 305$ А; $U_д = 37{,}5$ В; *2* — $I_{св} = 450$ А, $U_д = 36$ В; *3* — $I_{св} = 540$ А, $U_д = 37$ В [148].

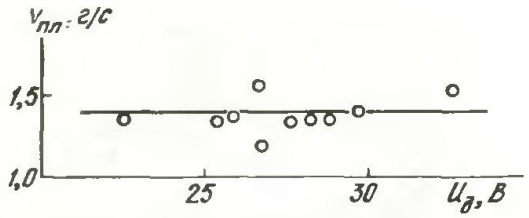


Рис. 159. Зависимость скорости плавления электродов УОНИ-13/45 диаметром 8 мм от напряжения дуги (обратная полярность, $I_{св}$ = 300... 320 А; [148].

ном режиме сварки постоянна. Скорость плавления повышается лишь вследствие нагрева стержня проходящим током, при этом могут укрупняться размеры капель [259]. В электродах с крупнокапельным переносом ($\xi = 0{,}4$ и более) благодаря конвекции и теплопроводности тепло дуги распределяется по объему капли с большой скоростью и изменения массы капли при прочих равных условиях не оказывают существенного влияния на скорость плавления стержня.

При питании дуги от источника с крутопадающей внешней характеристикой в первый момент времени после перехода капли скорость плавления стержня может даже снижаться вследствие удлинения дуги и падения тока.

Мгновенная скорость плавления электрода пропорциональна тепловой мощности $q_2(t)$, передаваемой стержню жидким металлом капли:

$$dm/dt = Kq_2(t). \qquad (4.2)$$

Коэффициент пропорциональности K определяется теплофизическими свойствами материала электрода:

$$K = 1/|c_{тв}(T_{пл} - T_0) + Q_{пл}|, \qquad (4.3)$$

где $c_{тв}$ — удельная теплоемкость металла стержня в интервале $T_{пл} - T_0$; $Q_{пл}$ — скрытая теплота плавления.

По данным работы [49], для низкоуглеродистой стали при изменении T_0 от 373 до 773 К коэффициент K колеблется от $0{,}8 \cdot 10^{-3}$ до $1{,}1 \cdot 10^{-3}$ г/Дж.

Значение q_2 можно определить по формуле

$$q_2 = \eta_t q_1, \qquad (4.4)$$

где q_1 — тепловая мощность, выделяемая дугой на торце электрода; η_t — коэффициент, учитывающий потери тепла капли на испарение и теплоотдачу с поверхности.

Дополнительное количество теплоты, выделяемой в капле при химических реакциях и проходящим током, невелико и им можно пренебречь [49].

Интегрирование уравнения (4.2) при условии, что $m = m_0$ при $t = 0$ и что q_2 для данного режима сварки электродом определенной марки постоянно, дает уравнение роста капли

$$m_к(t) = m_0 + Kq_2t. \qquad (4.5)$$

Продолжительность взаимодействия капли с окружающей средой. Эта величина во многом зависит от характера плавления и переноса металла. Определение данного важнейшего кинетического параметра по частоте перехода N и массе переходящих капель $m_п$ невозможно, поскольку отрывающаяся капля является лишь частью жидкого металла на торце электрода.

В начальный момент времени, когда начинает расти первая капля, $m_0 = 0$ и уравнение (4.5) приобретает вид

$$m_к(t) = Kq_2t. \qquad (4.6)$$

При установившемся процессе сварки масса капли в момент перед очередным переходом может быть представлена выражением

$$m_{ср} = m_0 + m_п. \qquad (4.7)$$

Средняя масса капли жидкого металла, находящегося на торце электрода в течение времени $\tau_к$, определяется выражением

$$m_к = m_0 + m_п/2. \qquad (4.8)$$

Продолжительность взаимодействия жидкого металла, поступающего в каплю непосредственно после очередного перехода, близка к времени между переходами $\tau_к$, поскольку этот металл находится в капле в течение всего промежутка времени $\tau_к$. Порции металла, плавящиеся перед отрывом капли, взаимодействуют с окружающей средой в течение очень короткого промежутка времени. Для кинетических расчетов следует пользоваться усредненным по массе капли временем взаимодействия

$$\tau_к^{ср} = m_{ср}/v_{ст}^{ср}, \qquad (4.9)$$

где $v_{ст}^{ср}$ — средняя массовая скорость плавления электродного стержня. С из-

менением скорости $v_{ст}^{ср}$ изменяется и масса жидкого металла на электроде по мере его плавления, т. е.

$$v_{ст}^{ср} = m_п/\tau_к. \qquad (4.10)$$

Подставляя значения $v_{ст}^{ср}$ и $m_{ср}$ в уравнение (4.9), получаем выражение для $\tau_к^{ср}$ через параметры переноса металла, определяемые из опыта:

$$\tau_к^{ср} = (m_0/m_п + {}^1/_2)\,\tau_к. \qquad (4.11)$$

Отношение $m_0\tau_к/m_п$ в уравнении (4.11) показывает, в течение какого промежутка времени произойдет обновление металла, остающегося на электроде, а $\tau_к/2$ представляет собой усредненное время существования переходящей капли с массой $m_п$.

Для электродов с мелкокапельным переносом металла, когда $\tau_к$ сравнительно невелико, величиной $\tau_к/2$ без особых погрешностей можно пренебречь. Тогда равенство (4.11) упрощается к виду

$$\tau_к^{ср} = m_0\tau_к/m_п, \qquad (4.12)$$

что идентично выражению [49]

$$\tau_к^{ср} = \tau_к\mu/(1-\mu), \qquad (4.13)$$

где $\mu = m_0/m_к$.

Определение $\tau_к^{ср}$ по формуле (4.12) для электродов с крупнокапельным переносом дает большие погрешности. Это положение можно проиллюстрировать следующими экспериментальными данными. С помощью скоростной рентгенокиносъемки определены показатели переноса металла электродов опытной серии Ф с покрытием на шлакообразующей основе TiO_2 — CaF_2. Состав покрытий приведен ниже (в % по массе, без учета жидкого стекла):

Покрытие	Флюоритовый концентрат	Рутиловый концентрат	Ферромарганец ФМн1	Ферросилиций	Целлюлоза ЭЦ	Слюда (мусковит)
Ф1	0	80	10	4	2	4
Ф2	40	40	10	4	2	4
Ф3	80	0	10	4	2	4

Покрытие наносили на стержни (диаметром 8 мм) с разрезом. Площадь сечения этого стержня эквивалентна площади сплошного стержня диаметром 7,4 мм. Наружный диаметр покрытия составлял 12,5 мм, $K_{м.п} = 50$ %. Электроды прокаливали при температуре 620 К. Сварку выполняли постоянным током обратной полярности. Показатели переноса приведены в табл. 50.

Для электродов с крупнокапельным переносом металла величины $m_к$, $\tau_к$ и m_0 определялись экспериментально, масса переходящих капель $m_п$ — по уравнению (4.7). Для электродов с мелкокапельным переносом средняя масса переходящей капли находилась по формуле

$$m_п^{ср} = (M_1 - M_2)/N, \qquad (4.14)$$

где M_1 и M_2 — массы стержня на наблюдаемом участке в момент соответственно начала и конца отсчета; N — частота перехода капель.

Анализ приведенных данных показывает, что с увеличением содержания CaF_2 в покрытии масса переходящих капель $m_п$ резко возрастает, причем темп роста больше при малых количествах CaF_2.

Отношение $\mu = m_0/m_к$ зависит от состава покрытия. Этим отношением в значительной мере определяется время взаимо-

Таблица 50. **Показатели переноса электродного металла**

Покрытие	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$m_п$, г	N, с$^{-1}$	m_0, г	μ	$\tau_к$, с	$\tau_к^{ср}$, с, по уравнению	
								(4.12)	(4.11)
Ф1	357	32	0,07	16,5	1,0	0,93	0,06	0,86	0,89
Ф2	342	33,4	1,75	0,9	0,8	0,31	1,1	0,5	1,05
Ф3	360	30,8	2,05	0,4	0,25	0,16	2,4	0,3	1,5

действия $\tau_к^{ср}$. В наших опытах при изменении содержания TiO_2 и CaF_2 в покрытии μ изменялось в пределах 0,93—0,16.

Время взаимодействия $\tau_к^{ср}$ значительно повышается по мере увеличения содержания CaF_2 в покрытии. Отношение $\tau_к^{ср}/\tau_к$ в большей мере зависит от состава покрытия. Для электродов с покрытием на основе TiO_2 в условиях наших опытов $\tau_к^{ср}/\tau_к \approx 15$, а для электродов с покрытием на основе CaF_2 $\tau_к^{ср}/\tau_к < 1$.

Значения $\tau_к^{ср}$, вычисленные по формулам (4.11), (4.12), близки между собой лишь в случае сварки электродами с мелкокапельным переносом металла. Для электродов Ф2 и Ф3 значение $\tau_к^{ср}$ по формуле (4.12) существенно меньше значения, вычисленного по формуле (4.11). Выражение (4.11) позволяет получить более точные значения $\tau_к^{ср}$, поскольку оно учитывает продолжительность взаимодействия не только той части жидкого металла, которая остается на электроде после перехода капли, а всего металла, существующего на торце электрода.

2. Силы, действующие на каплю электродного металла

Изменение размеров капель и типа переноса металла зависит от соотношения сил, действующих на жидкую каплю на торце электрода. Основные из них — сила тяжести, поверхностное натяжение, электромагнитная сила, реактивное давление паров и ионов, нейтрализовавшихся на катоде, аэродинамическая сила, давление газов и паров, образующихся внутри капель, и др. Режим сварки, состав электродного металла и газовой среды, состояние поверхности проволоки и ее диаметр, полярность тока определяют величину отдельных сил и направление равнодействующей.

Исследованию этих факторов посвящены многие работы, выполненные как в нашей стране, так и за рубежом [45, 104, 238, 276, 251, 227, 234 и др.].

Сила тяжести $P_т$ способствует отрыву капель при сварке в нижнем положении и противодействует ему при сварке в потолочном положении,

$$P_т = m_к g. \qquad (4.15)$$

Поверхностное (межфазное) натяжение $P_{п.н}$ в процессе формирования капли при сварке в нижнем положении удерживает ее на торце электрода. При замыкании же дугового промежутка поверхностное натяжение металла ванны втягивает каплю и тем способствует отрыву ее от торца электрода. Величина $P_{п.н}$ определяется межфазным натяжением на границе металл — газ или металл — шлак и геометрическими размерами капли [104, 148],

$$P_{п.н} = \frac{2\sigma}{R}\pi r_э^2, \qquad (4.16)$$

где σ — межфазное (поверхностное) натяжение на границе металл — шлак.

В работе [316] для оценки поверхностного натяжения предлагается формула

$$P_{п.н} \approx h_к^2 \nabla\sigma \approx h_к \Delta\sigma, \qquad (4.17)$$

где $h_к$ — средняя длина (высота) капли; $\Delta\sigma$ — различие в удельной (действующей на единицу длины капли) силе поверхностного натяжения между верхней и нижней частью капли, которое, по данным [316], составляет порядка 0,1 Н/м.

Величина поверхностного натяжения σ зависит от природы жидкости, ее температуры и наличия в жидкости различных примесей. В различных исследованиях приводятся значения σ для железа от 1,25 до 1,86 Дж/м^2 при 1820 К. Такие колебания объясняются степенью чистоты исходных материалов — металла, газа, подложки. Для чистого железа характерны большие значения σ. Примеси оказывают существенное влияние на поверхностное натяжение железа. Наиболее поверхностно-активны кислород и сера. Так, градиент поверхностного натяжения $\nabla\sigma$ (см. формулу (4.17)) вызван, по мнению авторов работы [316], исключительно сегрегацией кислорода, которая, в свою очередь, является функцией температуры [265, 255]. По данным [265], добавки 0,1 % кислорода в чистое железо понижают σ с 1,9 до 1,3 Н/м при 1923 К.

Поверхностная активность азота в сплавах Fe — Mn — N, Fe — Si — N, Fe — C — N невелика. Водород оказывает малое влияние на поверхностное натя-

жение чистого железа. В техническом железе водород играет роль раскислителя. Mn, Si, C в низкоуглеродистых и низколегированных сталях обладают сравнительно небольшой поверхностной активностью. Наличие шлака на поверхности металла может существенно изменить поверхностное натяжение.

Все сварочные шлаки, как правило, снижают межфазное натяжение [225]. Особенно сильное влияние оказывают окислительные шлаки. По данным работы [145], межфазное натяжение железа на границе со шлаком системы FeO — CaO — MgO — SiO_2, содержащим 6,2 % FeO, составляет 750 мДж/м². При увеличении содержания FeO в шлаке до 47,5 % межфазное натяжение железа снижается до 390 мДж/м².

Зависимость поверхностного натяжения от температуры экспериментально исследована в сравнительно узком диапазоне температур. Температурный коэффициент поверхностного натяжения железа отрицательный [148]. В интервале температур 1810—2020 К он может быть определен по формуле

$$\sigma = 1856 \pm 3 - 0{,}23 \pm 0{,}02\,(T - 1534). \quad (4.18)$$

В литературе приводятся значения $\partial\sigma/\partial T$ —(0,23 ... —0,5) мДж/(м² · К). При сварке плавящимся электродом капли нагреваются до температуры кипения [173]. Для оценки влияния температуры на поверхностное натяжение в ряде случаев пользуются формулой Этвеша. На основе этой формулы Б. Е. Патоном и П. П. Шейко получено выражение для оценки величины поверхностного натяжения [135]

$$P_{\text{п.н}} = \frac{4{,}2\,(T_{\text{кр}} - T)}{(M/\rho)^{2/3}}\,\pi r_{\text{э}}, \quad (4.19)$$

где $T_{\text{кр}}$ — критическая температура для данного металла; M — молекулярная масса; T — температура расплавленного металла в данный момент времени в исследуемой координате.

Увеличение температуры капель (например, при увеличении тока) приводит к существенному снижению поверхностного натяжения и может быть одной из причин уменьшения размера переносимых капель с ростом тока при сварке в инертных газах на обратной полярности. Повышение температуры капель вызывает увеличение концентрации паров металла электрода в дуговом промежутке, что приводит к изменению режима горения дуги и перераспределению электромагнитных сил, действующих на каплю, способствуя заострению конца электрода и направленному струйному переносу металла [273]. Измельчение капель при сварке на прямой полярности низкоуглеродистой проволокой, покрытой солями щелочных или щелочноземельных металлов, связывается с уменьшением межфазного натяжения, вызванного электрокапиллярными явлениями [137].

Значение электрокапиллярных явлений в работе [137] преувеличено. Соединения щелочных и щелочноземельных элементов, нанесенные на поверхность проволоки, как указывалось выше, резко изменяют эмиссию электронов с катода, при этом увеличивается площадь активного пятна, снижается плотность тока в нем. Эти обстоятельства уменьшают отталкивающее действие электромагнитной силы, осевая составляющая которой начинает способствовать отрыву капель. Обнаруженное А. М. Супте лем повышение температуры капель при введении в проволоку ионизаторов также может способствовать уменьшению поверхностного натяжения и размера капель [193].

Электромагнитные силы. Значительная роль в переносе капель электродного металла принадлежит электромагнитным силам $P_{\text{э.м}}$ [45, 276, 251, 135, 133 и др.]. Они вызваны взаимодействием проводника с током (каковыми, например, являются капли жидкого металла и столб дуги), и собственного магнитного поля, создаваемого этим током. При протекании тока через проводник в последнем под действием собственного магнитного поля тока возникает радиально направленная сжимающая сила (пинч-эффект), убывающая к периферии с увеличением расстояния от проводника. В жидком или газообразном проводнике эти силы создают гидростатическое давление, определяемое по формуле [50]

$$P_{\text{г.с}} = \frac{\mu I_{\text{св}} I}{4}\,(1 - \rho_i^2/r_c^2), \quad (4.20)$$

где ρ_i — расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки.

Выразив ток через его плотность и площадь поперечного сечения проводника, получим

$$P_{\text{г.с}} = \frac{\mu j^2}{4}(r_c^2 - \rho_i^2). \qquad (4.21)$$

Если сечение по длине проводника переменное (в случае сварки плавящимся электродом), то, кроме осевой составляющей плотности тока j_z, возникает радиальная составляющая j_r, которая создает осевые силы пинч-эффекта, стремящиеся оторвать элемент большего сечения от элемента меньшего сечения [209, 45, 251 и др.].

Анализ осевой составляющей выполнен многими исследователями [45, 251, 286, 89 и др.]. По В. И. Дятлову, величина осевой составляющей определяется формулой [45]

$$P_{\text{э.м}} = K_1 I_{\text{св}}^2 = A_3 I_{\text{св}}^2 \left(1 + 4{,}6 \lg \frac{r_c}{r_э}\right), \qquad (4.22)$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности; $A_3 = 5 \cdot 10^{-8}$ Н/А^2; r_c — радиус столба дуги.

Радиус столба дуги (для свободно расширяющейся дуги) можно определить по формуле [45]

$$r_c = I_{\text{св}}^{2/3}/1{,}25U_l^{2/3}. \qquad (4.23)$$

Заменив в выражении (4.22) радиусы столба дуги и электрода на плотность тока в них, получим [45]

$$P_{\text{э.м}} = A_3 I_{\text{св}}^2 \left(1 + 2{,}3 \lg \frac{j_э}{j_c}\right), \qquad (4.24)$$

где $j_э$ — плотность тока в электроде; j_c — плотность тока в столбе дуги.

При сварке на малых силах, действующих на каплю, и плотности тока на электроде, когда радиус столба меньше радиуса электрода, второй член уравнений (4.22) и (4.24) становится отрицательной величиной и действие пинч-эффекта будет уменьшаться и может привести к изменению знака силы $P_{\text{э.м}}$. При очень малых силах, действующих на каплю, и малых плотностях тока пинч-эффект будет препятствовать отрыву капли.

В. Грин предложил формулу, связывающую величину осевой составляющей электромагнитной силы с размерами активного пятна на электроде и диаметром электрода [251]:

$$P_{\text{э.м}} = I_{\text{св}}^2 \left\{ \ln \frac{\sin\theta}{\sin\psi} - \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{1-\cos\theta}\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{2}{(1-\cos\theta)^2} \ln \frac{2}{1+\cos\theta} \right\}, \qquad (4.25)$$

где θ — угол между осью сферической капли и образующей конуса, основание которого равно диаметру активного пятна, а вершина находится в центре капли; ψ — угол между осью капли и образующей конуса, основание которого равно диаметру электрода, а вершина находится в центре капли, $\psi = 180°$.

Ряд допущений, принятых в работе [251],— независимость плотности тока в активных пятнах от полярности, состава электрода и защитного газа, постоянство поверхностного натяжения и независимость его от температуры — позволяют лишь ориентировочно рассчитать величину критических токов, при которых $P_{\text{э.м}}$ изменяет знак, т. е. начинает способствовать отрыву капли.

Для сварки тонкой проволокой Св-08Г2С в CO_2 на обратной полярности такой расчет выполнен Дефизом [237].

Рассчитанные величины критического тока экспериментально не были подтверждены, что, по-видимому, связано с упомянутыми выше допущениями.

Необходимым условием количественной оценки величины электромагнитных сил является знание плотности тока в активных пятнах и их площади. В настоящее время плотность тока в пятнах экспериментально определена лишь для простейших случаев сварки при кратковременном горении дуги.

Помимо осевой составляющей электромагнитной силы, переносу металла способствует радиальная составляющая, которая создает в жидком металле и столбе дуги гидростатическое давление, достигающее максимального значения по оси симметрии. Столб дуги, как известно, чаще всего имеет конусообразную форму, в результате чего под действием разности электромагнитных сил в нем возникают мощные газовые (плазменные) потоки, выравнивающие давление по оси столба дуги. Непосредственно под каплей расплавленного металла давление газа ока-

зывается меньшим, чем внутри капли, вследствие чего капля как бы втягивается в столб дуги и приобретает конусообразную форму. Из ее торца при достаточно больших токах очень часто отделяются мелкие капли, создающие впечатление непрерывной струи. Такой характер переноса наблюдался при плавлении стальной проволоки в инертных газах на обратной полярности. Исследования, выполненные с помощью скоростной рентгенокиносъемки, показали, что такой перенос имеет место и при плавлении покрытых электродов, и при сварке под флюсом [159, 168, 160].

Исследованию аэродинамических сил на перенос металла посвящены работы Д. Амсона [227], А. Веллса [320] и др. По Амсону и Салтеру, аэродинамическая сила определяется аэродинамическим торможением капли в газовом потоке $P_г$ и магнито-кинетическими силами $P_{м\text{-}к}$, обусловленными несбалансированностью гидростатического давления внутри капли и на поверхности раздела жидкость — газ [97, 148, 227, 320 и др.].

Магнито-кинетическая сила по величине пропорциональна квадрату величины тока и определяется по уравнениям

$$P_{м\text{-}к} = \frac{1}{2}\pi r_к^2 p_м = \frac{1}{4}\frac{\mu}{4\pi}\left(\frac{r_к}{r_э}\right)^4 I_{св}^2 \text{ при } r_к \leqslant r_э; \quad (4.26)$$

$$P_{м\text{-}к} = \frac{1}{2}\pi r_к^2 p_м = \frac{1}{4}\frac{\mu}{4\pi} I_{св}^2 \text{ при } r_к > r_э, \quad (4.27)$$

где $p_м$ — несбалансированное гидростатическое давление внутри и на поверхности капли; $r_к$ — радиус капли; $\mu/4\pi$ — коэффициент пропорциональности. По Меккеру $p_м$ определяется выражением [148]

$$p_м = \frac{1}{2}\frac{\mu}{4\pi} I_{св} j. \quad (4.28)$$

Сила $P_г$ представляет собой сопротивление тела (капли) течению газового потока и приближенно может быть оценена по выражению [97]

$$P_г = cs\rho_г \frac{v_n^2}{2g}, \quad (4.29)$$

где c — безразмерный коэффициент; s — миделево сечение участка столба единичной длины; $s = 2r_c$, v_n^2 — нормальная составляющая скорости движения столба; $\rho_г$ — плотность газа (при нормальных условиях), в котором движется столб.

Поскольку скорость плазменного потока неизвестна, в расчетах ее принимают равной скорости потока газа.

Испарение металла с поверхности капли и химическое взаимодействие капель со шлаком или газовой фазой, вызывающее образование и выделение газа, приводят к возникновению реактивных сил, действующих на каплю [45, 234, 104, 137].

Испарение металла происходит в основном в области активных пятен. Считается, что равнодействующая реактивных сил приложена в центре активного пятна [137]. Перемещение пятен вызывает изменение положения места приложения реактивных сил и значительную подвижность капель. Величина реактивных сил зависит от размеров активных пятен, плотности тока в них, а также от давления и скорости движения паров материала электрода.

С. Кукси и Д. Мильнер [234] в зависимости от давления пара металла и полярности выделяют шесть типов переноса. В металлах с высоким давлением пара (Mg, Zn, Cd) отталкивание капель реактивными силами происходит на обеих полярностях. В металлах со сравнительно низким давлением пара (Al, Fe, Cu, Ni, Ti, Mo, W) роль реактивных сил на обратной полярности при сварке в аргоне невелика и в бóльшей мере проявляется на прямой полярности для металлов с низкой температурой плавления.

Размеры капель на прямой и обратной полярностях для металлов с низким давлением пара в зависимости от тока приведены на рис. 160, *а*, *б* [234].

Действие отталкивающих сил на прямой полярности ассоциируется с образованием катодного пятна. Наименьший эффект наблюдается у алюминия, так как пятно здесь непрерывно движется и реактивные силы вызывают волнистость поверхности, не изменяя ее внешних контуров. При сварке сталей на малых токах катодное пятно часто не образуется. При увеличении тока возникает катодное пят-

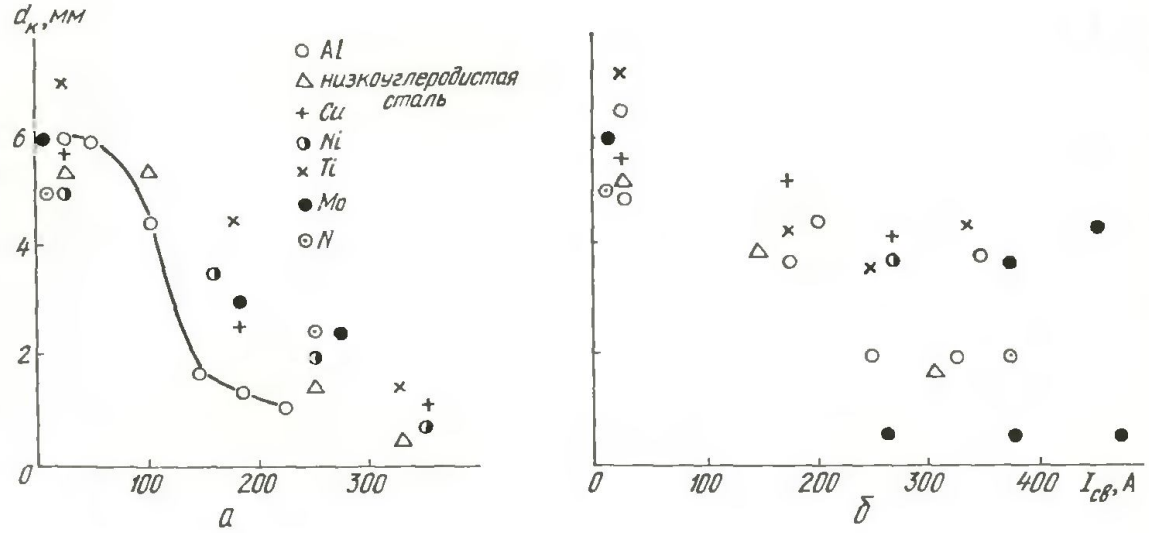


Рис. 160. Зависимость диаметра капель электродного металла от материала проволоки и величины тока (сварка в аргоне, диаметр проволоки 1,6 мм):

а — обратная полярность; *б* — прямая полярность [234]

но, проявляется действие реактивных сил и увеличивается масса капель электродного металла.

У никеля и особенно меди образование катодного пятна происходит непрерывно, действие реактивных сил проявляется в большей мере и размер капель при дальнейшем увеличении тока не снижается, как это наблюдается при плавлении стальной или алюминиевой проволоки. При сварке вольфрама, молибдена и титана на прямой полярности реактивные силы проявляются в меньшей степени.

При сварке в CO_2 проволокой Св-08 диаметром 1 мм на прямой полярности реактивное давление паров пропорционально квадрату тока с коэффициентом пропорциональности $2 \cdot 10^{-7}$ Н/А^2. При плавлении проволоки на обратной полярности значение этого коэффициента снижается до $5 \cdot 10^{-8}$ Н/А^2 и ниже. Полученные данные позволили В. И. Дятлову приближенно рассчитать количество испаряемого металла, скорость паров и реактивное давление паров [45]

$$P_п = (kU_э j_{а.п}/Q_п)^2 V_к I_{св}, \qquad (4.30)$$

где k — коэффициент пропорциональности, равный $3{,}02 \cdot 10^{-3}$ (А$^{-1/2}$); $U_э$ — эффективное падение напряжения у электрода; $Q_п$ — скрытая теплота испарения; $j_{а.п}$ — плотность тока в активном пятне; $V_к$ — удельный объем пара при температуре кипения, для стали $V_к = 4{,}4 \cdot 10^3$ см^3/г.

Сжатие дуги приводит к увеличению плотности тока в пятнах, что должно вызывать повышение реактивного давления паров. Нанесение на проволоку веществ с низкой работой выхода электронов вызывает снижение эффективного падения напряжения в катодной области. Это приводит к снижению реактивного давления паров и, несмотря на возможное возрастание при этом величины $P_{э.м}$, получению мелкокапельного переноса на прямой полярности. Подобный эффект, как известно, наблюдается при сварке активированной проволокой. На обратной полярности величина реактивного давления паров невелика и при сварке стали, алюминия и титана в среде аргона ею можно пренебречь [45].

По оценке С. Кукси и Д. Мильнера [234], реактивное давление паров на прямой полярности составляет 10^{-2}—10^{-3} Н [234] (в расчетах приняты скорость испарения 0,01 г/с, плотность тока 10^9 А/м^2).

Дополнительную силу при сварке на прямой полярности может вызвать реактивное давление ионов, нейтрализующихся на поверхности катода и отбрасываемых в столб дуги. При приближенной оценке получено давление ионов (в Н) на железный катод [45]

$$P'_i = 1{,}15 \cdot 10^{-4} I_{св}^{2/3}; \qquad (4.31)$$

$$P''_i = 5{,}6 \cdot 10^{-5} I_{св}^{2/3}. \qquad (4.32)$$

Выражение (4.31) относится к случаю, когда нейтрализовавшийся у катода поток ионного газа отражается обратно в столб дуги, формула (4.32) — к случаю расширения его в полупространство до атмосферного давления. Для случая сварки покрытыми электродами более приемлема формула (4.31).

Давление электронного тока P_e на активные пятна дуги обусловлено изменением их количества движения на границе газ — металл [97, 45]. Это давление позволяет анодному пятну дуги углубиться в жидкую сталь на величину примерно 1,7 мм. Это в 4—5 раз больше углубления катодного пятна, что объясняют действием потока газов или паров на анодное пятно [97].

Давление электронного тока рассчитывается по формуле [97]

$$P_e = j_{а.п} \sqrt{m_e \cdot 2\,(eU_а - 3KT_к)/e^2}, \quad (4.33)$$

где $T_к$ — температура катода.

Давление электронного тока препятствует переносу капель и наиболее сильно проявляется при сварке на обратной полярности.

В работе [316] рассмотрена также так называемая подъемная сила, препятствующая переносу металла и обусловленная нагревом металла капли. Ее порядок определяется как

$$P_в \sim h_к^3 \rho g \alpha_р \Delta T, \quad (4.34)$$

где $h_к$ — средняя длина (высота) капли; $\alpha_р$ — коэффициент расширения; ΔT — разность между температурой поверхности анода (катода) и температурой плавления.

Мнения исследователей о роли окисления углерода противоречивы. Одни считают, что образование пузырьков CO внутри капель является определяющим фактором в переносе металла [87, 104, 136, 137, 243], другие отводят этому процессу второстепенную роль [49, 205 и др.]. Исследования в основном проводились при расплавлении голой проволоки или электродов с тонким покрытием на воздухе.

3. Перенос электродного металла

Плавление электрода при дуговой и электрошлаковой сварке носит периодический — капельный характер. Под

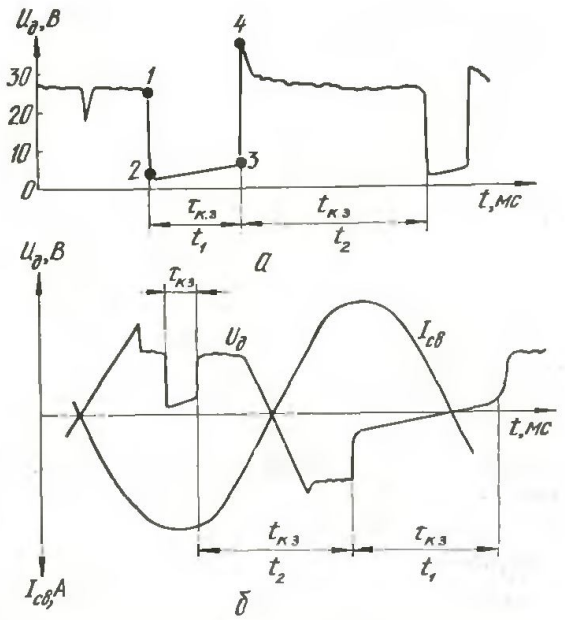


Рис. 161. Схема изменения электрических параметров дуги при сварке на постоянном (*а*) и переменном (*б*) токах ($t_{к.з}$ — продолжительность пауз между отдельными короткими замыканиями).

действием теплоты дуги граница жидкого и твердого металла непрерывно продвигается вглубь электрода вдоль его оси. Когда слой жидкого металла на торце электрода достигает некоторого предельного в данных условиях сварки размера при выполнении условия $\Sigma P_{отр} > \Sigma P_{уд}$ ($P_{отр}$ и $P_{уд}$ — силы, отрывающие и удерживающие каплю на торце электрода), часть металла отделяется от него в виде капли. Жидкий слой на оплавляющемся торце электрода вновь нарастает, вновь формируется капля и т. д. Отделяющиеся электродные капли переносятся в ванну, образующуюся на свариваемом изделии.

При сварке покрытыми электродами наблюдается несколько типов переноса: крупнокапельный, взрывообразный и мелкокапельный. Крупнокапельный перенос характерен для электродов с основным покрытием [97, 148]. Он наблюдается также при сварке электродами других типов на малых токах.

При взрывообразном переносе капли беспорядочно отделяются от жидкого металла на торце электрода. Этот тип переноса наблюдается в ряде случаев у электродов с рудно-кислым и органическим покрытиями и сопровождается повышенным разбрызгиванием. Мелкокапельный перенос металла характерен для

электродов с рутиловым покрытием на обычных плотностях тока.

Переход капли в сварочную ванну может сопровождаться короткими замыканиями межэлектродного промежутка или происходить без них, путем свободного перелета капель.

Между циклом переноса металла и осциллограммами сварочного напряжения или тока дуги существует тесная связь. На рис. 161 показана типичная осциллограмма напряжения дуги при сварке электродами с короткими замыканиями, вызванными переходом электродных капель в сварочную ванну. На ней различаются интервалы роста t_2 и перехода капли t_1. В момент начала перехода капли (короткое замыкание дугового промежутка электродной каплей, зона *1—2* на рис. 161) напряжение на дуге резко падает до нескольких вольт, а за время перехода (зона *2—3*) — медленно повышается. Окончание перехода капли (разрушение мостика жидкого металла) сопровождается резким повышением напряжения на дуге, завершающимся достижением максимальной его величины (точка *4*). Последнюю часто называют пиком повторного возбуждения дуги [97]. Он, по-видимому, обусловлен самоиндукцией источника питания.

В случае переноса капель без коротких замыканий напряжение на дуге изменяется не так резко и не достигает столь низких значений, а время t_1 значительно меньше. Поэтому изучать характер переноса металла при сварке электродами, характеризующимися переходом капель без замыканий дугового промежутка, по осциллограммам режима сварки довольно затруднительно.

Частота отрыва капель $f_к$, их форма, время пребывания на торце электрода $\tau_к$, а также длительность перехода в сварочную ванну $\tau_{к.з}$ в значительной мере связаны с режимом сварки. Величина $\tau_к$ и масса переходящей ее части $m_п$ резко увеличиваются, если длина дуги превышает размеры свободно растущей капли [148]; ток при этом оказывает меньшее влияние [49]. По данным [104] при значительном увеличении тока число коротких замыканий заметно снижается на обеих полярностях. С ростом длины дуги число коротких замыканий также снижается [148].

К. Ишизаки [259, 260], изучая размеры капель путем собирания их в воду (сварка между электродом и угольным стержнем), установил, что с увеличением тока диаметр капель уменьшается для всех типов электродов. Данная зависимость наблюдалась как при сварке постоянным током обеих полярностей, так и переменным током.

Применительно к процессу сварки покрытыми электродами известно несколько работ, посвященных определению суммарного давления столба дуги на сварочную ванну. Так, при сварке на воздухе, в гелии и азоте металлическими стержнями, покрытыми электродами и угольными электродами на прямой и обратной полярности (ток до 220 А, длина дуги 5 мм) сила давления дуги составляет $3 \cdot 10^{-3}$—$2{,}6 \cdot 10^{-2}$ Н [233]. Давление потока газов, паров и частичек металла электрода на поверхность ванны пропорционально квадрату силы тока [139]. По данным Ф. Эрдмана-Еснитцера и Примке, для электродов с покрытием органического типа сила давления дуги находилась в пределах 0—$1{,}4 \cdot 10^{-2}$ Н [233].

Мнения исследователей о роли тех или иных сил расходятся. К. К. Хренов считает, что осевая сила, возникающая в результате пинч-эффекта, способствует отрыву капель [209]. По мнению К. Андо и М. Хазегава, в диапазоне токов, применяемых для ручной дуговой сварки, пинч-эффект не играет существенной роли в переносе металла. В. И. Дятлов указывает, что при ручной сварке пинч-эффект препятствует отрыву капли [45].

По мнению А. Г. Мазеля, при сварке электродами и стержнями на плотности тока до 20 А/мм^2 на перенос металла с электрода в ванну главное влияние оказывают газы, расширяющиеся в каплях, и реактивное действие газов, выбрасываемых из капли [104]. Образование газа в каплях связывается в основном с окислением углерода. Эксперименты, проведенные Г. Г. Корицким и И. К. Походней с использованием метода скоростной рентгенокиносъемки, не обнаружили существенного влияния процесса окисле-

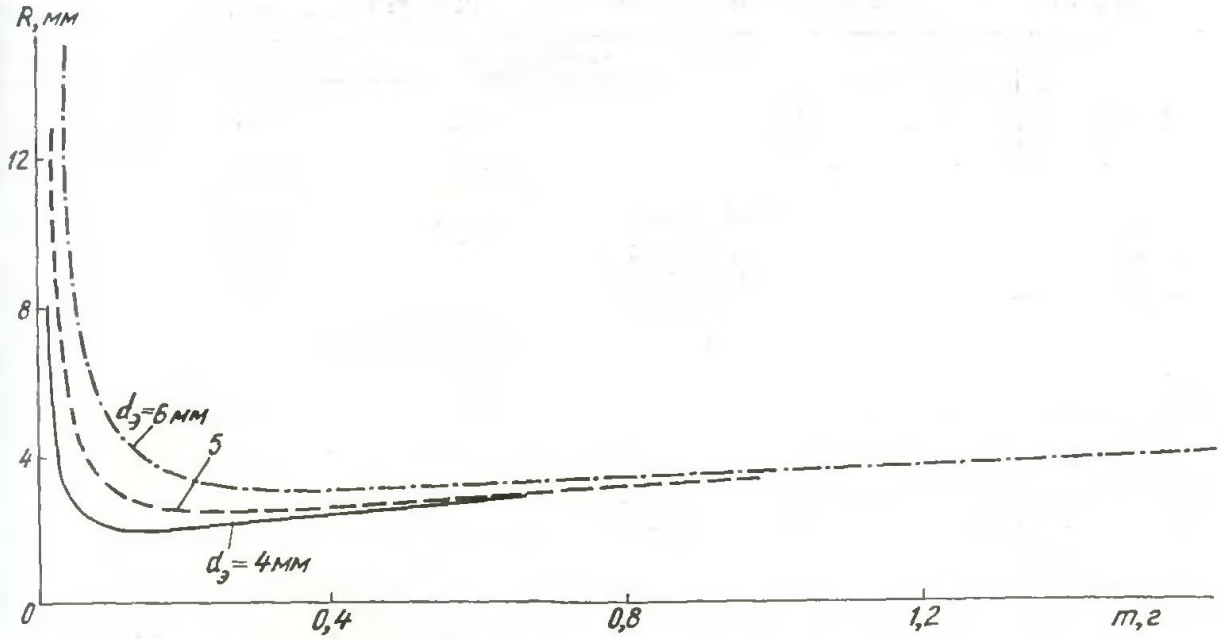


Рис. 162. Зависимость радиуса кривизны капли от ее массы для электродов различного диаметра.

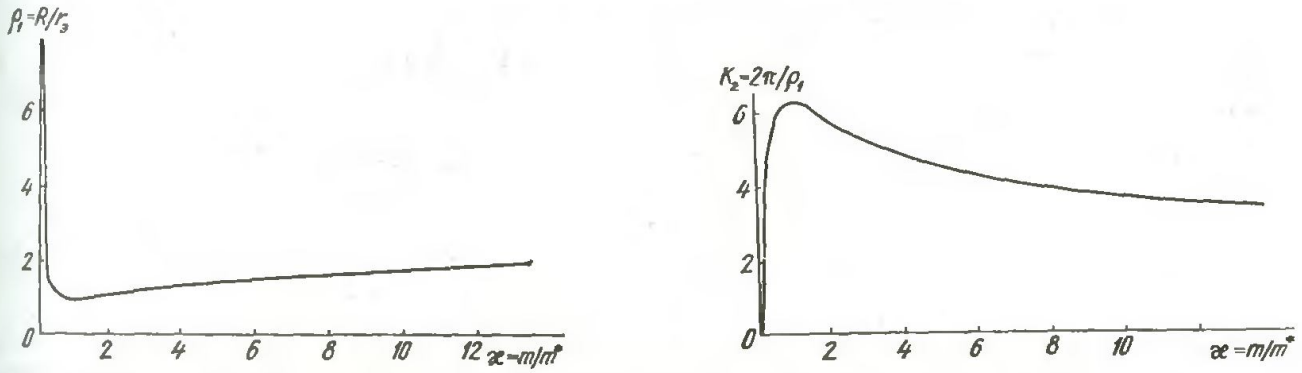


Рис. 163. Зависимость относительного радиуса капли от ее относительной массы.

Рис. 164. Зависимость силы поверхностного натяжения от относительной массы капли [77].

ния углерода и образования CO на характер переноса электродного металла [148]. Значительная роль в работе [104] отведена также микровзрывам, разрушающим активное пятно и приводящим к его смещению в новое положение.

Силы, действующие на каплю при сварке покрытыми электродами, зависят от тока, геометрических параметров капли, теплофизических свойств материала капли, шлака и атмосферы дуги и могут быть определены из уравнений (4.15), (4.16), (4.20), (4.22), (4.26), (4.27), (4.29), (4.30), (4.31) и (4.33).

Вследствие того что в процессе плавления стержня изменяются масса и геометрические параметры электродных капель, отдельные силы и вся система в целом не остаются постоянными. В то же время знание характера изменения сил в процессе роста капли важно для изыскания путей управления переносом электродного металла. В связи с этим Г. Г. Корицким проведены исследования динамики сил, действующих на каплю в процессе ее формирования на торце электрода. Результаты этих исследований приведены ниже.

При условии, что капля на торце электрода имеет форму шарового сегмента с основанием, равным сечению электрода [77], массу капли можно определить из уравнения

$$m_к = \frac{\pi\rho}{3}\left[2R^3 \pm (2R^2 + r_э^2)\sqrt{R^2 - r_э^2}\right], \quad (4.35)$$

где R — радиус кривизны поверхности капли. Геометрическая интерпретация

Таблица 51. **Расчетные и экспериментальные массы капель на торце электрода перед переходом**

Диаметр электрода, мм	Расчетная масса капли-полусферы, г	Экспериментальная масса капель, г, при сварке электродами			
		АНО-4	ЦМ-7	УОНИ-13/45	Опытными карбонатно-флюоритными
4	0,12	0,13—0,18	0,19—0,46	0,20—0,50	—
5	0,23	0,29—0,51	—	—	—
6	0,39	0,50—0,57	—	—	0,40—1,60

этой зависимости для капель, формирующихся на стержнях диаметром 4, 5 и 6 мм, представлена на рис. 162. Кривые $R = f(m, r_э)$ характеризуются экстремумом при $R = r_э$ (см. также формулу (4.35)), т. е. когда капля принимает форму полусферы. Это позволяет представить закон изменения размеров растущей капли в относительных координатах $(m/m^*, R/r_э)$, где m^* — масса капли при $R = r_э$.

Отнеся массу капли к массе полусферы с радиусом $r_э$, получаем зависимость, справедливую для стержней любого диаметра

$$\varkappa = \rho_1^3 \pm (\rho_1^2 + 0{,}5)\sqrt{\rho_1^2 - 1}, \qquad (4.36)$$

где $\varkappa$ — относительная масса капли, $\varkappa = m/m^*$;

ρ_1 — относительный радиус капли, $\rho_1 = R/r_э$.

На рис. 163 эта зависимость представлена графически.

Если в выражении (4.16) заменить абсолютные размеры капли относительными, получим

$$P_{п.н} = \frac{2\pi}{\rho_1}\sigma r_э = K_2 \sigma r_э, \qquad (4.37)$$

где K_2 — коэффициент пропорциональности.

Изменение коэффициента K_2 в процессе роста капли представлено на рис. 164. Поверхностное натяжение увеличивается с ростом капли до $\varkappa = 1$, а затем уменьшается, облегчая отрыв капли от электрода.

Из табл. 51, где приведены результаты расчета массы капель-полусфер радиусом $r_э$ и $\rho = 7$ г/см^3 и экспериментальные данные, определенные с помощью рентгенокиносъемки, следует, что масса капли на торце электрода перед переходом, как правило, превышает массу капли-полусферы.

Связь между размерами электрода, капли, активного пятна и величиной электромагнитной силы исследовалась с использованием выражения (4.25). Для этого тригонометрические величины в формуле (4.25) заменялись соответствующими геометрическими. Перейдя от абсолютных размеров капли и пятна к относительным, получим [77]

$$P_{э.м} = K_э I_{св}^2, \qquad (4.38)$$

где

$$K_э = 10^{-2}\left(\ln \rho_2 + \frac{2\rho_2}{2\rho_1^2 - \rho_2^2 - 2\rho_1\sqrt{\rho_1^2 - \rho_2^2}} \times \right.$$
$$\times \ln \frac{2\rho_1}{\rho_1 + \sqrt{\rho_1^2 - \rho_2^2}} -$$
$$\left. - \frac{\rho_1}{\rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - \rho_2^2}} - \frac{1}{4}\right); \qquad (4.39)$$

ρ_2 — относительный радиус активного пятна (отношение радиуса активного пятна на капле к радиусу электродного стержня). Выражение (4.38) позволяет изучить картину изменения электромагнитной силы в процессе роста капли при различных размерах активного пятна путем совместного решения уравнений (4.36) и (4.39).

Результаты расчетов, приведенные на рис. 165, показывают, что в процессе роста капли электромагнитная сила, удерживающая каплю на торце электрода, ослабевает, а при $\varkappa > 1$ снова увеличивается. Направление и величина этой силы определяется относительными размерами активного пятна. Чем оно меньше, тем большая сила удерживает каплю. Электромагнитная сила способствует отрыву капли только при $\rho_2 \geqslant 1$.

Электромагнитная сила в процессе роста капли на торце электрода изменяется. С целью выяснения закономерностей ее изменения с помощью скорост-

ной киносъемки определены размеры активных пятен на капле при сварке некоторыми типами покрытых электродов [77]. Результаты обработки кинограмм приведены в табл. 52. Видно, что размеры активных пятен при сварке на реальных режимах меньше диаметра электрода и увеличиваются с увеличением тока. В этих условиях электромагнитная сила удерживает каплю на торце электрода. Характер зависимости $P_{э.м} = f(I_{св})$ зависит от соотношения скоростей изменения тока и коэффициента пропорциональности $K_3 = f(\rho_2)$.

Анализ изменения отдельных составляющих системы сил, действующих на растущую каплю, позволяет написать общее уравнение, описывающее условие отрыва электродных капель от торца электрода:

$$P_т + P_{г.с} \geqslant P_{п.н} + P_п + P_{э.м}. \quad (4.40)$$

Для проверки изложенных выше положений выполнен графический расчет массы капли при сварке опытными электродами диаметром 6 мм с флюоритным покрытием без газообразующих компонентов в покрытии (данные Г. Г. Корицкого). Принималось, что $I_{св} = 270$ А, масса растущей капли изменяется по линейному закону [168], межфазное натяжение на границе малоуглеродистая сталь — флюоритный шлак $\sigma_{1-2} = 0{,}83$ Н/м [227], относительный радиус активного пятна

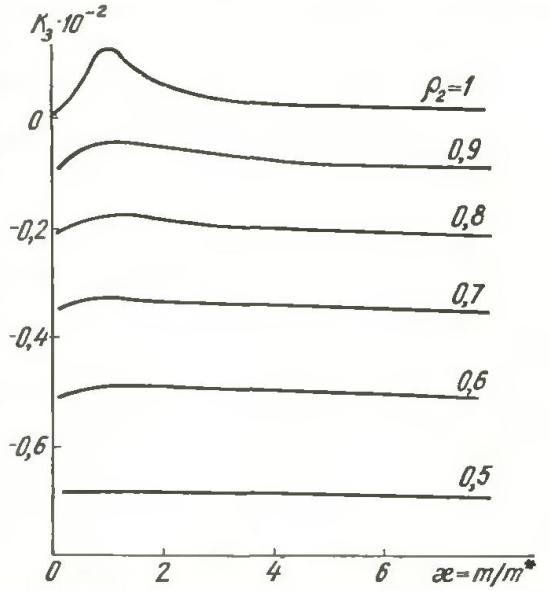


Рис. 165. Изменение коэффициента K_3 в зависимости от относительных размеров капли и активного пятна [77].

Таблица 52. **Диаметр активных пятен на каплях при сварке покрытыми электродами**

Электрод	$I_{ср}$, А	$d_{а.п}$, мм
АНО-4	150	2,8
	350	3,8
Опытный карбонатно-флюоритный, 40 % $CaCO_3$, 30 % CaF_2	250	2,5
	300	2,9
	400	4,5
Опытный флюоритный, 70 % CaF_2	270	3,5
	300	3,2

Примечание. $d_э = 6$ мм, обратная полярность

$\rho_2 = 0{,}58$ (см. табл. 52). Принято также, что аэродинамическое торможение капли в газовом потоке отсутствует. В расчете не учитывалось также давление электронного тока P_e.

Величины $P_{п.н}$ и $P_{э.м}$ рассчитывались по формулам (4.37) и (4.38) с помощью кривых рис. 164 и 165. При этом принималось, что реактивное давление паров

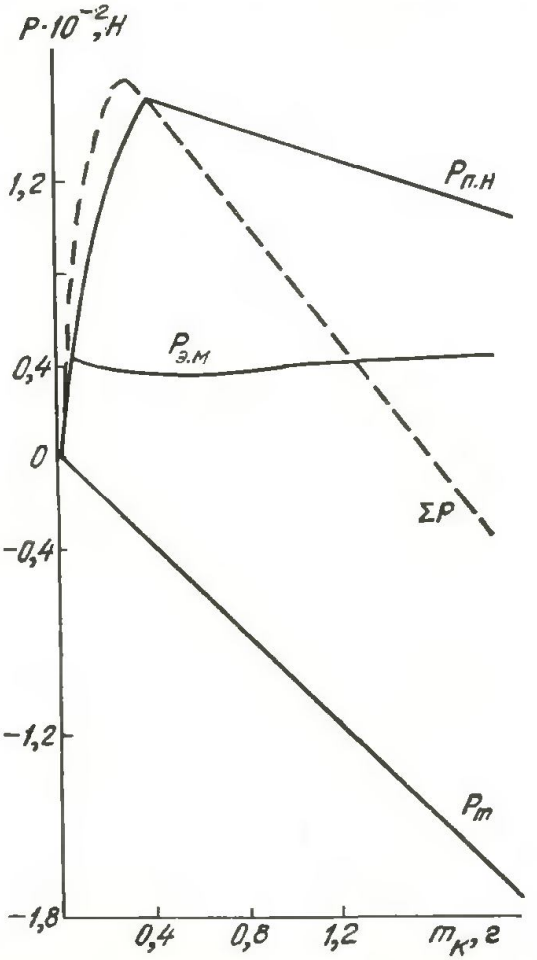


Рис. 166. Графический расчет величины $m_к$ для опытного варианта электрода с основным покрытием [77].

материала капли уравновешивается несбалансированным гидростатическим давлением в капле.

Графически силы, действующие на каплю, приведены на рис. 166. Результаты расчета сопоставлялись с экспериментальными данными. Значение $m_к$, при котором равнодействующая ΣP принимает отрицательное значение, соответствует массе капли перед переходом. Расчет дает $m_к = 1{,}56$ г, что удовлетворительно совпадает со значением $m_к = 1{,}6$ г, определенным экспериментально методом скоростной рентгенокиносъемки.

Ряд исследователей связывает характер переноса металла с условиями плавления покрытия [233, 104]. Втулочка из неоплавившегося покрытия на торце электрода играет роль сопла, из которого выделяются газы. А. Г. Мазель предполагает, что наблюдаемое уменьшение числа коротких замыканий при достаточно большой мощности, выделяемой в приэлектродной области, связано с раздроблением капель внутри втулочки под действием реактивных сил [104]. Наличие глубокой втулочки, по мнению Ф. Эрдмана-Еснитцера [243], приводит к повышению температуры капель и усилению взаимодействия железа с покрытием, снижению вязкости металла и его выбрасыванию в виде мелких капель.

Во многих исследованиях подчеркивается, что силы, возникающие при взаимодействии газов с металлом, изменяются мало, однако при этом существенно изменяются физические свойства металла [233, 322]. В частности, наличие газов изменяет вязкость расплавленного металла и его поверхностное натяжение. Главным фактором, определяющим характер переноса металла, Т. Иошида считает наличие кислорода в атмосфере дуги и его влияние на физические свойства металла [322]. Состав шлаковой фазы также может влиять на поверхностное натяжение и вязкость металла. В связи с этим большое значение имеет и температура, от которой зависят вязкость и поверхностное натяжение металла капель.

Обзор литературы по переносу металла при ручной дуговой сварке позволяет сделать следующие выводы: 1) основная часть металла переносится в виде капель; 2) размеры и форма капель, частота их переноса зависят от состава покрытия, его толщины, режима сварки, полярности, так как эти факторы определяют свойства дуги, температуру и физические свойства металла, а также соотношение сил, действующих на каплю металла на торце электрода. Для оценки параметров переноса при сварке различными сварочными материалами необходимо проведение экспериментальных исследований.

4. Методы исследования и критерии оценки переноса электродного металла

Методы исследования переноса металла можно разделить на две группы:

1. Методы, непосредственно представляющие картину плавления электрода и поведения электродных капель на его торце, в том числе: а) «механические» (искусственное выделение капель с помощью металлических или иных пластинок, пересекающих дуговой промежуток, а также выделение капель в воду с последующим ситовым анализом) [148, 299, 136, 205]; б) фото-, свето- и рентгенографические [148, 247, 296, 299, 300, 302].

2. Косвенные методы, позволяющие измерять и оценивать параметры, физически связанные с переносом расплавленного металла: а) акустические, основанные на исследовании звукового спектра и давления шума, сопровождающего сварочный процесс [299, 242]; б) осциллографирование сварочного напряжения или тока с последующим их анализом [104, 282, 85, 300, 302, 318 и др.]; в) измерение и обработка информации, получаемой при анализе сварочного напряжения или тока в реальном масштабе времени, с помощью электронной аппаратуры [244, 282, 296 и др.].

Каждому из перечисленных методов исследования присущи определенные преимущества и недостатки. Так, на начальном этапе размеры переходящих капель определяли с помощью металлических пластинок, которыми пересекали дуговой промежуток, а также путем выделения капель в воду. Эти методы позволяют получить выборочные данные о

размерах частиц, отрывающихся от капель на торце электрода.

При собирании капель в воду использовали электрическую дугу, горящую между плавящимся электродом и угольной или медной пластиной, а также между двумя встречными электродами. Последующий ситовый анализ собранных капель позволил получить при статистической обработке данные об их размерах, однако при этом не исключались неточности, связанные с возможным дроблением капель о воду [260, 259], а также из-за изменения условий горения дуги.

Размер капель, отрывающихся от торца электрода и переходящих в ванну, определяли также путем наплавки на массивную медную пластину [136] или графитовый диск [205]. Для исключения слияния отдельных капель процесс вели с большой скоростью. Однако и эти методы не дали полного представления о действительных размерах капель при нормальных условиях сварки вследствие неизбежного изменения длины дуги и теплового баланса процесса.

Для исследования процессов переноса металла при сварке широко применялось осциллографирование электрических параметров режима [104, 127, 232]. Метод позволил оценивать характер переноса и устойчивость процесса сварки путем вычисления частоты отрыва и перехода электродных капель в сварочную ванну, а также косвенно судить об их размерах. Переход крупных капель довольно четко фиксировался на осциллограммах напряжения в виде характерных спадов $U_д$. При этом основным критерием для оценки переноса и устойчивости процесса служила длительность таких спадов напряжения (коротких замыканий дугового промежутка), пропорциональных величине капель [246, 295]. Кроме того, в работе [85] предложено оценивать устойчивость горения дуги величиной рассеяния (дисперсии) длительностей коротких замыканий, вызванных переходом капель, от среднего значения. Однако последний критерий, на наш взгляд, менее информативен и поэтому не получил широкого распространения.

Основной, наиболее существенный недостаток оценки переноса электродного металла с помощью осциллографирования — большие затраты времени на обработку осциллограмм и невысокая точность измерений.

В работах [25, 49] перенос электродного металла изучали методом регистрации момента отрыва капель от электрода, который сопровождался короткими замыканиями этих капель с проволочным датчиком-зондом, впрессованным в покрытие. По частоте таких замыканий судили о периодичности перехода капель Однако при использовании этого метода трудно исключить ошибки, связанные с возможными короткими замыканиями капли с датчиком вследствие отклонений капли от оси электрода [104]. Такие замыкания не сопровождаются переносом капли, однако будут фиксироваться осциллографом и искажать истинную картину процесса.

При сварке голыми стержнями и электродами с тонким покрытием для изучения процесса плавления и переноса электродного металла применялась скоростная киносъемка [49, 104, 198, 209], позволяющая судить о частоте и размере переходящих электродных капель. Однако для электродов с большой толщиной покрытия этот метод неприемлем из-за образования на конце электрода втулочки из нерасплавившегося покрытия, затрудняющей исследования.

Хорошие результаты при исследовании переноса металла при сварке толстопокрытыми электродами дало применение метода скоростной рентгеносъемки [149]. Это позволило исследовать процесс образования, роста и перехода капли в реальных условиях. При этом основными критериями оценки переноса служат масса остающейся и отрывающейся от электрода части капли, а также частота отрывов и время нахождения (роста) капли на торце электрода. Однако и этому методу исследования присущи определенные недостатки, главный из которых — трудоемкость обработки данных (необходимость проявления фотопленки или фотобумаги, выполнение подсчетов и измерений с учетом масштабного фактора и др.).

В последнее время для исследования переноса металла получают все большее

распространение различные приборы-счетчики и анализаторы, принцип действия которых основан на автоматической регистрации и последующей обработке характерных изменений электрических параметров сварочной дуги, вызванных переходом через нее капель. Чаще всего характер переноса металла оценивается путем регистрации и статистической обработки длительности характерных снижений напряжения (коротких замыканий), вызванных переходом капли в сварочную ванну. Длительность таких замыканий пропорциональна массе капли и времени ее перетекания в ванну [246, 295].

Попытки применить счетные приборы для оценки переноса металла известны достаточно давно. Так, по данным [247], Виш (ФРГ) еще в 1948 г. опубликовал результаты определения сварочно-технологических свойств при сварке голой электродной проволокой с помощью счетчика переходящих капель и интегрирующего вольтметра. По полученным данным расчетным путем определялась длительность коротких замыканий при переходе капель.

В США в конце 40-х годов разработан «параллельный анализатор» [282], позволяющий классифицировать длительность коротких замыканий на три временны́х класса. В работе [321] описан счетчик коротких замыканий с устанавливаемым порогом срабатывания по напряжению дуги, с помощью которого определяли общее количество коротких замыканий за время сварки. Позже, по данным [247], Келер и Мартин разработали прибор для подсчета числа коротких замыканий, применив в нем наряду с амплитудным дискриминатором (по напряжению) временно́й дискриминатор (по длительности коротких замыканий). Использование временного дискриминатора позволило не учитывать случайные касания каплей сварочной ванны (короткие замыкания малой длительности), не сопровождаемые переносом.

В нашей стране проведен ряд исследований переноса электродного металла, с использованием электронной аппаратуры [90, 186, 217 и др.]. Критерием оценки переноса металла по этим методикам служила частота коротких замыканий межэлектродного промежутка переходящими электродными каплями.

Рефельд и Эрдман-Еснитцер [244, 243] применили электронный счетчик коротких замыканий, работающий по принципу цифровой оценки временны́х промежутков. Такой прибор дает высокую точность и хорошую воспроизводимость результатов. При этом продолжительность отбора данных (время анализирования) заранее задается. Подобный прибор описан также в исследовании Штаудте [307].

В более поздних работах Эрдмана-Еснитцера и Рефельда [245, 247, 299, 246] описан принцип действия и устройство системы «Анализатор Ганновер», позволяющей автоматически регистрировать и проводить статистический анализатор параметров процесса сварки. В качестве критериев использованы длительность короткого замыкания и частота перехода капель. Авторы приводят результаты исследований при сварке электродами различных типов, а также в CO_2, хорошо согласующиеся с данными проводившихся параллельно киносъемки и осциллографирования.

В работе [309] сообщается о «параллельном анализаторе» для анализа длительностей коротких замыканий по двадцати регулируемым временны́м классам-диапазонам, устанавливаемым в широких пределах. В качестве задаваемого уровня срабатывания по напряжению применен «плавающий порог», величина которого устанавливается вместе с колебанием среднего напряжения дуги. До этого в аппаратуре подобного рода использовался порог срабатывания по напряжению, задаваемый перед экспериментом и не изменявшийся в течение всего опыта.

В Чехословакии для оценки переноса электродного металла используют электронные системы — анализатор ВУЗ-А1 [86], и его модификацию [289], позволяющие исследовать процесс методами временно́го и амплитудного анализов. Методика оценки основана на обработке характерных изменений напряжения дуги, вызванных процессом роста и перехода капель в сварочную ванну. По этим данным строят гистограммы распределения $U_д$, по которым определяют общую про-

должительность и число коротких замыканий (небольшие значения напряжения) в единицу времени, а также находят распределение коротких замыканий по продолжительности. В качестве критериев оценки переноса в рассматриваемых работах применены статистические характеристики значения $\tau_{к.з}$, в частности их средняя величина.

В последнее время создан ряд новых систем для исследований переноса металла [153, 169, 194, 246, 278, 297, 298 и др.]. Эти системы позволяют получать статистически обработанную информацию о частоте и длительности коротких замыканий при переходе электродных капель.

Методика исследования переноса электродного металла с помощью системы «Анализатор нестационарных процессов». Применяли информационно-измерительные системы АНП-1 и АНП-2, разработанные ИЯИ АН УССР и ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР [153, 169, 154, 157] и описанные во второй главе. Установлено [246, 295], что короткие замыкания тем длительнее, чем больше величина (масса) переходящих капель. Применительно к условиям ручной дуговой сварки количественная взаимосвязь (прямая пропорциональность) между величинами $\tau_{к.з}$ и $d_к$ ($d_к = A\tau_{к.з}$, A — коэффициент, зависящий от вида электродного покрытия) подтверждена в работе [161], о чем сказано ниже (см. параграф 5). Хотя при сварке эти величины (длительность коротких замыканий $\tau_{к.з}$ и временные интервалы между ними $T_{к.з}$) изменяются в значительных пределах, при их статистической обработке обнаруживаются закономерности, позволяющие судить о характере переноса металла.

Во время перехода капель напряжение на дуговом промежутке падает до нескольких вольт, поэтому оценивать характер переноса можно, регистрируя число таких спадов, их длительность и время пауз между отдельными короткими замыканиями (см. параграф 2 второй главы).

Результаты статистической обработки данных эксперимента в конечном счете представляются в виде гистограмм измеряемых величин ($\tau_{к.з}$ и $T_{к.з}$), а также в виде характеристик плотности вероятностей [29, 111] (см. уравнения (2.16), (2.17) и (2.18)).

В качестве основной характеристики переноса металла в настоящей работе принято среднее значение длительности коротких замыканий $\tau_{к.з}$, сопровождающих переход капель электродного металла. Вспомогательными характеристиками могут быть длительность временных интервалов между короткими замыканиями $T_{к.з}$, величина среднеквадратического отклонения длительности коротких замыканий $\sigma_{\tau_{к.з}}$, а также расчетная величина K, определяемая как доля времени, приходящаяся на переход капель в продолжительности полного цикла переноса:

$$K = \frac{\tau_{к.з}}{\tau_{к.з} + T_{к.з}} \cdot 100\ \%. \qquad (4.41)$$

В результате рассмотрения методов, используемых для оценки переноса металла, можно заключить следующее.

1. Одним из общих и наиболее существенных недостатков методов оценки переноса электродного металла, применявшихся до настоящего времени, является низкая точность результатов, высокая трудоемкость и длительность обработки данных.

2. С точки зрения повышения эффективности исследований переноса электродного металла весьма перспективно применение быстродействующих электронных измерительных систем в сочетании с ЭВМ.

3. Разработанные ИЯИ АН УССР совместно с ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР информационно-измерительные системы АНП-1 и АНП-2 позволяют в реальном масштабе времени изучать и контролировать основные показатели переноса электродного металла.

4. Отработана методика исследования переноса электродного металла с помощью систем АНП-1 и АНП-2. В качестве основного критерия при оценке переноса выбрана длительность коротких замыканий, вызванных переходом капли в сварочную ванну.

5. Проверка методики оценки переноса металла с помощью систем АНП-1 и

АНП-2 показала ее высокую производительность, точность и достоверность получаемых результатов.

5. Длительность коротких замыканий и характер переноса электродного металла

Анализ литературных данных показывает, что наиболее информативным и приемлемым на практике критерием переноса электродного металла при сварке постоянным током является длительность коротких замыканий. Чтобы по величине $\tau_{к.з}$ судить непосредственно о размерах и массе капель, необходимо знать корреляцию между ними в широком диапазоне сварочных токов. Статистические методы позволяют определять не только средние значения $\tau_{к.з}$, но и границы рассеяния, поэтому появляется возможность судить о некотором распределении капель по размерам (массе), т. е. расширить наши знания о характере переноса металла.

До настоящего времени авторы [296, 246] на основании данных, полученных осциллографированием и скоростной киносъемкой процесса сварки алюминиевой проволокой, предполагали, что между длительностью коротких замыканий и размером (массой) капель существует пропорциональная зависимость. Однако данные о количественной взаимосвязи

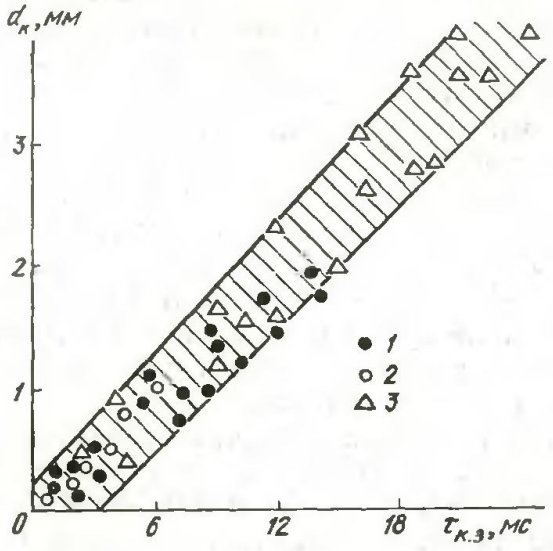


Рис. 167. Взаимосвязь между диаметром капель и длительностью коротких замыканий при сварке электродами с рутиловым (*1*, *2*) и основным (*3*) покрытиями:
1 — $I_{св}$ = 100...200 А; *2* — $I_{св}$ = 170...200 А; *3* — $I_{св}$ = 100...200 А [248, 246].

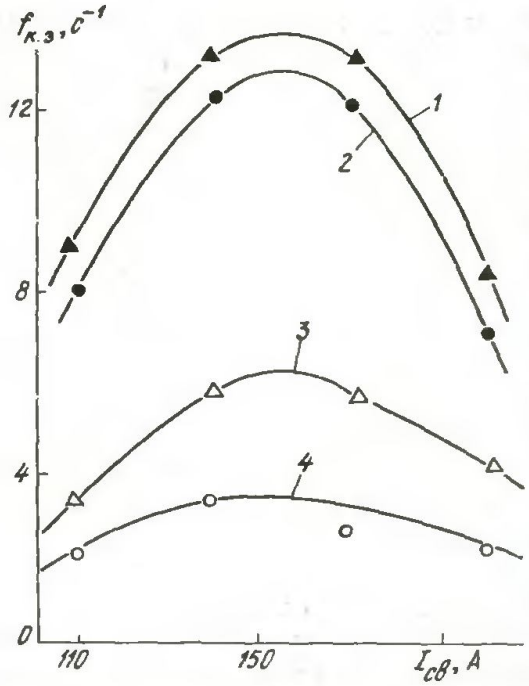


Рис. 168. Зависимость частоты перехода капель с короткими замыканиями от тока при сварке электродами с рутиловым (*1* — АНО-6; *2* — АНО-4) и основным (*3* — УОНИ-13/45, *4* — АНО-11) покрытиями [161].

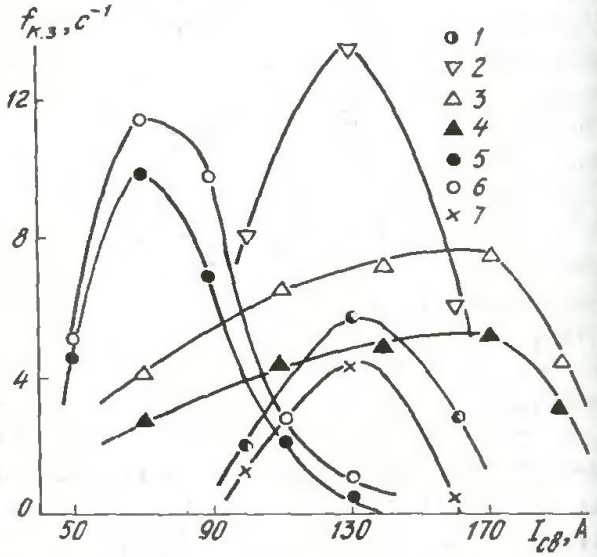


Рис. 169. Зависимость частоты перехода капель с короткими замыканиями от тока при сварке: в нижнем положении:
1 — электродами УОНИ-13/45, $d_э$ = 4 мм [104]; *2* — электродами ЦМ-7, $d_э$ = 4 мм [104]; *3* — проволокой МЬК8, d = 1,2 мм [302]; *4* — проволокой 10 MnSi5, d = 1,2 мм [302]; *5*, *6* — проволокой 10 MnSi5, d = 1,6 мм соответственно в смеси Ar + + CO_2 и в среде CO_2 [300]; в потолочном положении: *7* — УОНИ-13/45; $d_э$ = 4 мм.

между указанными показателями в этих работах отсутствуют.

В. Д. Макаренко обработаны экспериментальные данные работ [148, 308], полученных при использовании электродов

Таблица 53. **Число электродных капель, переходящих в сварочную ванну с короткими замыканиями и без них**

Электрод	$I_{св}$, А								
	110			160			200		
	$N_{к.з}$	$\Sigma N_к$	$\frac{N_{к.з}}{\Sigma N_к}$, %	$N_{к.з}$	$\Sigma N_к$	$\frac{N_{к.з}}{\Sigma N_к}$, %	$N_{к.з}$	$\Sigma N_к$	$\frac{N_{к.з}}{\Sigma N_к}$, %
АНО-6	300—366	358—385	84—94,5	385—421	494—500	77—85,5	33—50	525—844	3,9—9,5
УОНИ-13/55	127—148	164—178	77,5—83,5	190—213	250—254	74—85	95—114	795—1000	9,5—14,3
АНО-11	75—89	87—94	86—95	185—214	246—248	74,5—86,5	130—156	405—430	30—38,6

с рутиловым и основным покрытием методом скоростной киносъемки. Для пересчета частоты коротких замыканий и их доли в общем времени сварки на их длительность использовали результаты измерений скорости плавления электродов. Результаты расчета приведены на рис. 167. Видно, что с увеличением $\tau_{к.з}$ пропорционально возрастает диаметр капель. Однако низкая точность методов исследования и недостаточно высокая достоверность измерений показателей переноса из-за ограниченного числа опытов могли внести значительную погрешность в окончательный результат, поэтому этот вопрос требовал экспериментальной проверки.

Сложность изучения взаимосвязи между $\tau_{к.з}$ и размерами (массой) капель состоит в том, что при сварке покрытыми электродами с увеличением тока сварки перенос капель только с короткими замыканиями (малые токи) может переходить в процесс переноса без коротких замыканий (свободно летящие капли, большие сварочные токи), т. е. при этом существенно сокращается число регистрируемых коротких замыканий $N_{к.з}$. На графике, характеризующем зависимость $f_{к.з} = f(I_{св})$, этот момент ярко выражен: на кривой имеется характерный максимум (рис. 168 и 169). Например, при сварке электродами основного вида диаметром 4 мм он наблюдается при $I_{св} = 150...160$ А.

Важно отметить, что в области малых токов рассматриваемая зависимость практически линейна. В то же время с увеличением тока скорость плавления электрода возрастает линейно во всем диапазоне режимов сварки, т. е. становится очевидным, что часть капель переходит межэлектродный промежуток без коротких замыканий. Поэтому очень важно среди общего количества переходящих капель определить ту долю, переход которой сопровождается короткими замыканиями. Зная долю капель, переходящих с короткими замыканиями в зависимости от режима сварки, можно вычислять оставшуюся часть капель, переход которых не сопровождается короткими замыканиями, а также потери металла на разбрызгивание и испарение.

В. Д. Макаренко и В. Н. Горпенюком проведены исследования этого вопроса. Методика экспериментов состояла в следующем. На медной водоохлаждаемой пластине, установленной вертикально над коробом с водой, выполняли сварку электродами марки АНО-6 с ильменитовым покрытием, а также электродами марок УОНИ-13/55 и АНО-11 с основным покрытием, диаметр стержня 4 мм. Капли собирали в воду, после окончания эксперимента их тщательно очищали от частичек шлака, просушивали и классифицировали по размерам и массе. Принималось, что каждому короткому замыканию соответствует переход капель определенных размеров. При этом считали, что чем больше длительность коротких замыканий, тем больше размер (масса) переходящих электродных капель.

Определялись диаметр, масса и число капель, переходящих дуговой промежуток как с короткими замыканиями, так и без них. Результаты измерений и вычислений приведены в табл. 53 и на рис. 170 и 171. Необходимо отметить, что

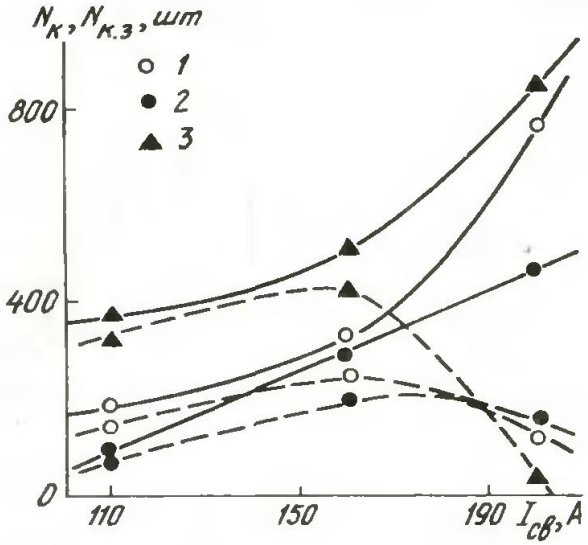
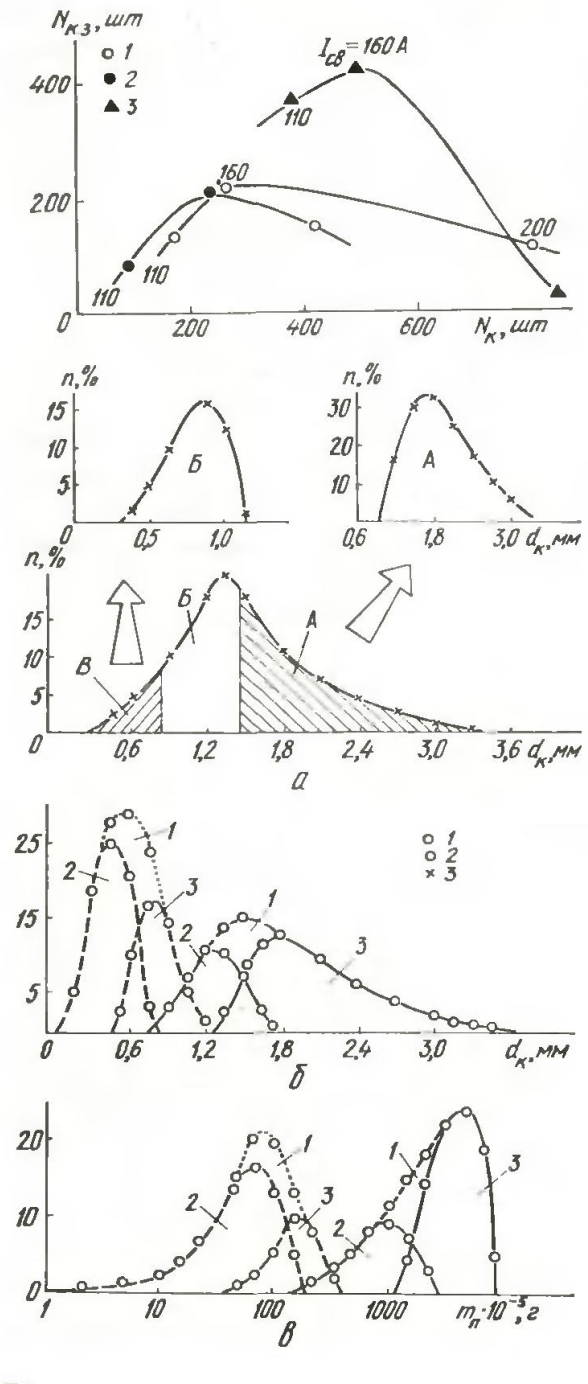


Рис. 170. Зависимость общего числа капель (сплошные кривые) и числа коротких замыканий (штриховые кривые) от тока:
1 — УОНИ-13/55; *2* — АНО-11; *3* — АНО-6.

Рис. 171. Взаимосвязь между числом коротких замыканий и общим числом капель при сварке электродами УОНИ-13/55 (*1*), АНО-11 (*2*) и АНО-6 (*3*).

Рис. 172. Распределение плотности вероятности диаметров (*а*, *б*) и масс (*в*) капель, переходящих с короткими замыканиями и без них, при сварке электродами АНО-6 (*А*), АНО-11 (*Б*) и УОНИ-13/55 (*В*) ($d_э = 4$ мм, $I_{св} = 170$ А):

1 — общее число капель; *3*, *2* — число капель, переходящих соответственно с короткими замыканиями и без них.



четкой границы между размерами капель, переходящих с короткими замыканиями и без таковых, не обнаруживается.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что существует «размытая» граница размеров (массы) капель (область *Б* на рис. 172, *а*), отделяющая области с двумя типами переноса метал-

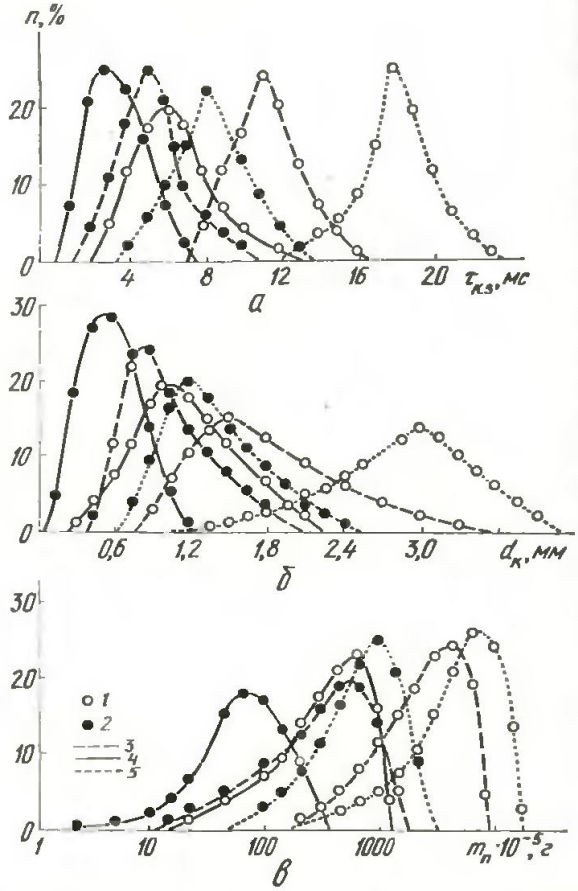


Рис. 173. Распределение плотности вероятности длительности коротких замыканий (*а*), диаметров (*б*) и массы (*в*) капель:
1 — АНО-11; *2* — АНО-6; *3* — $I_{св} = 110$ А; *5* — $I_{св} = 200$ А; *4* — $I_{св} = 160$ А [161].

Таблица 54. **Статистические характеристики переноса электродного металла**

Электрод	Обозначение показателя переноса	110 А		160 А		200 А	
		M	*D*	*M*	*D*	*M*	*D*
УОНИ-13/55	$\tau_{к.з}$, мс	12,24	0,41	8,81	0,32	5,24	0,47
	$d_к$, мм	1,99	0,06	1,38	0,04	0,71	0,0035
	$m_п$, г	0,045	$9,5\cdot10^{-5}$	0,024	$5,4\cdot10^{-5}$	$0,3\cdot10^{-2}$	$6,9\cdot10^{-7}$
АНО-11:	$\tau_{к.з}$, мс	16,38	6,91	10,40	4,98	6,14	2,83
лабораторные	$d_к$, мм	2,80	0,48	1,45	0,32	0,85	0,06
	$m_п$, г	0,095	$2,2\cdot10^{-4}$	0,03	$1,3\cdot10^{-4}$	$0,57\cdot10^{-2}$	$2,3\cdot10^{-6}$
	$\tau_{к.з}$, мс	18,1	0,40	11,25	0,38	6,50	0,49
промышленные	$d_к$, мм	2,93	0,09	1,8	0,07	0,96	$9,6\cdot10^{-3}$
	$m_п$, г	0,104	$2,2\cdot10^{-4}$	0,044	$1,3\cdot10^{-4}$	$0,87\cdot10^{-2}$	$2,8\cdot10^{-6}$

Таблица 55. **Размер и масса капель, переходящих с короткими замыканиями (перед чертой) и без них (за чертой)**

Электрод	110 А		160 А		200 А	
	$d_к$, мм	$m_п$, г	$d_к$, мм	$m_п$, г	$d_к$, мм	$m_п$, г
АНО-11: лабораторные промышленные	3,2/1,75 3,5/1,95	0,14/0,025 0,19/0,035	2,1/1,15 2,3/1,25	0,04/0,007 0,05/0,0085	0,85/0,45 1,3/0,7	0,0025/0 0005 0,009/0,002
АНО-4	1,75/0,92	0,025/0,004	1,1/0,6	0,0055/0,001	0,65/0,35	0,0015/0,0002
АНО-6	1,65/0,9	0,02/0,0036	1,05/0,55	0,005/0,0009	0,7/0,38	0,002/0,0003
УОНИ-13/45	2,5/1,34	0,06/0,015	1,75/0,95	0,025/0,004	1,05/0,58	0,005/0,00085

ла: область *A* — переход капель с короткими замыканиями и область *B* — без коротких замыканий.

На рис. 173, *б*, *в* представлены данные о распределении общего числа капель по размерам (диаметру) и массе для электродов с рутиловым и основным покрытиями, характеризующихся, как известно, соответственно относительно мелкокапельным и крупнокапельным переносом металла.

Аналогичные распределения приведены на рис. 172, *б*, *в* для общего числа капель (гистограмма *1*), а также капель, переходящих как с короткими замыканиями (*2*), так и без них (*3*). Видно, что с увеличением сварочного тока от 110 до 200 А средние значения диаметра и массы капель снижаются.

Анализ данных рис. 173, *а* показывает, что с увеличением $I_{св}$ значение $\tau_{к.з}$ уменьшается, причем для электродов с рутиловым покрытием эта величина существенно ниже, чем для электродов с основным покрытием, во всем диапазоне $I_{св}$.

Сравнение гистограмм распределения капель по размерам, массе и длительности коротких замыканий в широком диапазоне режимов сварки (см. рис. 172, *б* и 173) показывает, что между ними существует корреляция, характерная для определенных величин $I_{св}$: с уменьшением диаметра (массы) переходящих капель снижается длительность коротких замыканий, вызванных их переходом в сварочную ванну, и наоборот.

В табл. 54 приведены результаты статистической обработки показателей переноса электродного металла. Использованы следующие характеристики статистических совокупностей: математическое ожидание M, дисперсия $D = \sigma^2$ и доверительный интервал для ξ, который определяется неравенством

$$|\xi - M| \leqslant 3\sigma/\sqrt{n}, \qquad (4.42)$$

где ξ — случайная величина ($\tau_{к.з}$, $d_к$ или $m_п$); n — число интервалов разбиений.

Среднестатистические показатели переноса — диаметры $d_к$ и массы $m_п$ капель,

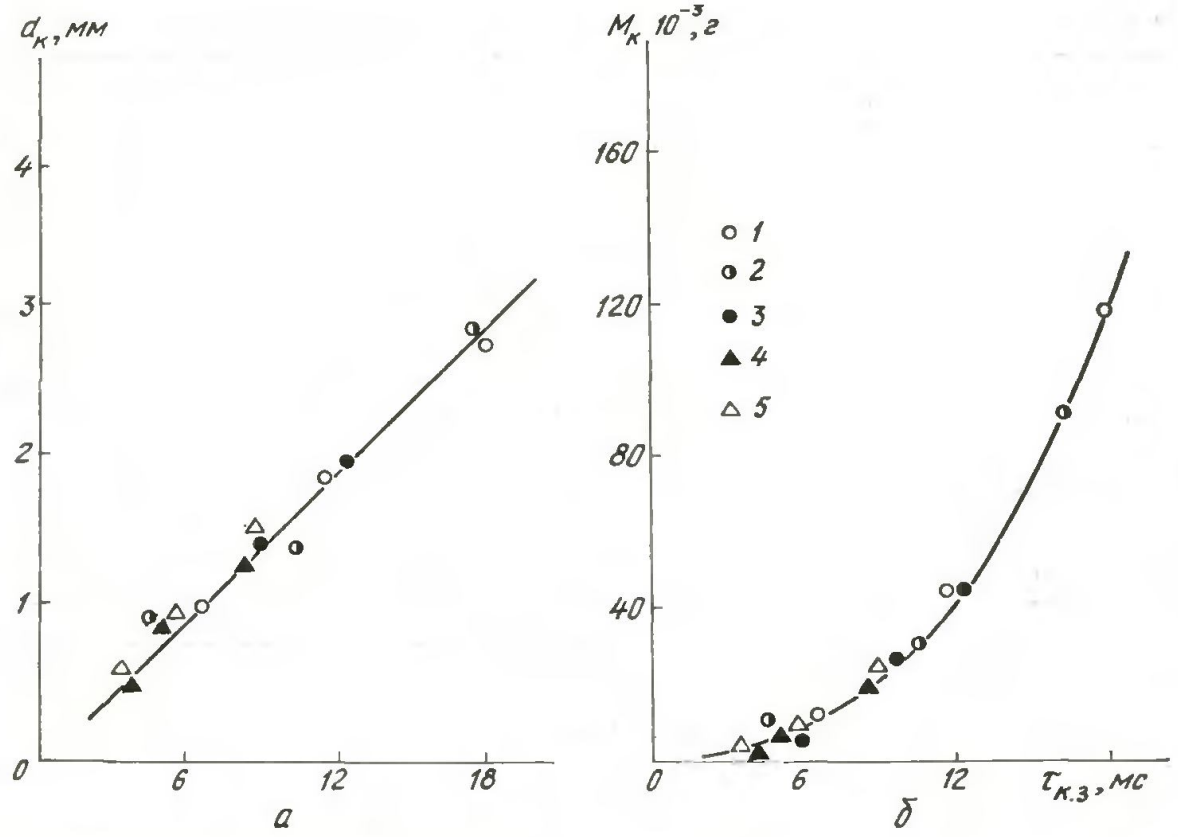


Рис. 174. Взаимосвязь между диаметром (*а*) и массой (*б*) электродных капель и длительностью коротких замыканий:

1, *2* — АНО-11 соответственно промышленные и лабораторные; *3* — УОНИ-13/45; *4* — АНО-6; *5* — АНО-4.

переходящих с короткими замыканиями и без них, приведены в табл. 55. По данным табл. 54 и 55 построены зависимости между длительностью коротких замыканий, массой и диаметром капель (рис. 174, *а*, *б*). Видно, что с ростом $\tau_{к.з}$ пропорционально увеличивается размер (диаметр) капель, переходящих в сварочную ванну. Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами, приведенными на рис. 167.

Аналитически взаимосвязь между диаметром капель и длительностью коротких замыканий выражается следующими уравнениями регрессии первого порядка: для капель, переходящих с короткими замыканиями,

$$d_к = 0{,}20\tau_{к.з}; \qquad (4.43)$$

для общего числа капель, переходящих как с короткими замыканиями, так и без них:

$$d'_к = 0{,}18\tau_{к.з}; \qquad (4.44)$$

для капель, переходящих без коротких замыканий,

$$d_к = 0{,}11\tau_{к.з}. \qquad (4.45)$$

Взаимосвязь между массой капель и длительностью коротких замыканий описывается уравнениями регрессии третьего порядка:

$$m_п = 0{,}33 \cdot 10^{-4}\tau^3_{к.з}; \qquad (4.46)$$

$$m'_п = 0{,}20 \cdot 10^{-4}\tau^3_{к.з}; \qquad (4.47)$$

$$m''_п = 0{,}14 \cdot 10^{-4}\tau^3_{к.з}. \qquad (4.48)$$

Вычисленные коэффициенты корреляции равны 0,94—0,99, что показывает хорошее соответствие экспериментальных данных полученным уравнениям регрессии.

В связи с этим полученные выше уравнения (4.43) — (4.48) могут применяться в практических расчетах для вычислений диаметра и массы капель.

Уравнение регрессии, выведенное по результатам расчета, приведенного на рис. 168, имеет вид

$$d_к = (0{,}14 \ldots 0{,}19)\ \tau_{к.з}. \qquad (4.49)$$

Сравнение уравнений (4.43) и (4.49) показывает хорошую их сходимость.

Полученные уравнения регрессии являются простейшей статистической моделью процесса переноса металла, что позволяет использовать их для прогнозирования показателей переноса при сварке электродами с рутиловым и основным покрытиями.

Анализ данных рис. 171 показывает, что в интервале $I_{св} = 110...160$ А число капель, переходящих с короткими замыканиями, линейно увеличивается с ростом тока. При этом доля таких капель в общем числе также велика: $N_{к.з}/N_к = 75...95$ %. В интервале же $I_{св} = 160...200$ А наоборот, число капель, переходящих с короткими замыканиями, уменьшается с ростом тока, несмотря на то что общее их число пропорционально увеличивается (см. рис. 171). Характерно, что меньшие значения $\tau_{к.з}$, как правило, соответствуют электродам с рутиловым покрытием. Среднестатистические значения и характер распределения $\tau_{к.з}$ в процессе ручной дуговой сварки могут быть использованы для получения статистически достоверных данных о размерах (массах) переходящих капель.

На основании полученных результатов В. Н. Горпенюк и В. Д. Макаренко предложили расчетно-экспериментальный метод определения показателей переноса электродного металла [161], который состоит в определении статистически достоверных размеров (диаметров), масс и числа переходящих капель и их распределения с использованием данных о длительности и частоте коротких замыканий, а также линейной скорости плавления электрода, определенных в широком диапазоне сварочных токов.

В качестве примера оценки корректности метода определялись показатели переноса металла при сварке электродами УОНИ-13/55 на токе $I_{св} = 160$ А, $\tau_{к.з} = 11{,}5$ мс, $f_{к.з} = 5\ с^{-1}$, $t_{св} = 30$ с. $d_э = 4$ мм.

Показатели переноса электродного металла рассчитывали по уравнениям (4.43) — (4.48) и с использованием экспериментальных данных (см., например, рис. 171). Результаты расчета приведены ниже (перед чертой — данные для капель, переходящих с короткими замыканиями, за чертой — без них):

$d_к$, мм	$m_п$, г	$\Sigma m_п$, г	$N_к$
2,3/1,2	0,051/0,0092	7,5/0,46	150/50

Таблица 56. **Размер и масса электродных капель при ручной дуговой сварке**

Электрод	$I_{св}$, А	$d_к$, мм	$m_п$, г	Литературный источник
УОНИ-13/55	140—170	1,7—2,2	0,04—0,06	[50]
ДСК-50	140—160	1,8—2,5	0,05—0,08	[104]
КВ 1XS	120—150	2—2,4	0,05—0,07	[248]

Для сравнения в табл. 56 представлены данные о размерах и массе переходящих капель.

Сравнение полученных данных показывает их хорошую сходимость.

Ошибка определения показателей переноса электродного металла предложенным методом составляет 5—8 %.

Расчетно-экспериментальный метод позволяет определять характеристики переноса электродного металла, которые могут быть использованы в расчетах, в частности, при исследовании кинетики металлургических процессов при сварке покрытыми электродами.

6. Результаты исследования переноса металла

Объектом исследования служили электроды с основным покрытием отечественного и зарубежного производства с диаметром стержня 2,5—4 мм. В отдельных экспериментах использовали опытные электроды с переменным соотношением мрамор — плавиковый шпат. Сварку выполняли от генератора постоянного тока модели SII фирмы «Кьельберг».

Характер переноса металла оценивали с помощью систем АНП-1 и АНП-2 по величине средней длительности коротких замыканий, характеризующей размеры переходящих капель.

Влияние режима сварки. Для определения характера переноса металла изучали зависимость $\tau_{к.з}$ как функцию величи-

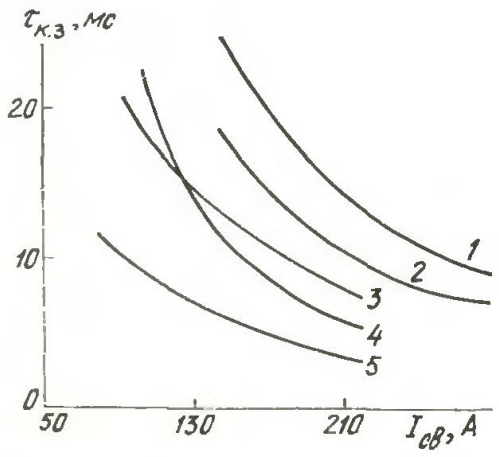


Рис. 175. Зависимость длительности коротких замыканий от тока [153]:
1, 2 — $d_э = 5$ мм; *3, 4* — $d_э = 4$ мм; *5* — $d_э = 3{,}25$ мм.

ны $I_{св}$ для каждой марки электрода. В некоторых случаях нижняя граница оптимальных значений $I_{св}$ соответствовала перерывам в горении дуги (при отсутствии «примерзания» электрода к изделию).

На рис. 175 представлены результаты испытаний ряда промышленных марок электродов с основным покрытием при сварке на обратной полярности. С увеличением величины тока в широком диапазоне режимов сварки длительность коротких замыканий уменьшается, т. е. процесс переноса электродного металла становится более мелкокапельным. Это вызвано перераспределением сил, действующих на электродную каплю. Как показано выше (см. параграф 2 настоящей главы), с повышением тока результирующая сил, способствующих переходу капель в сварочную ванну, увеличивается быстрее, чем силы, препятствующие переносу.

Влияние полярности и рода тока сварки на перенос электродного металла. При исследовании влияния полярности тока сварки на перенос металла применялись два метода: рентгенокиносъемка дугового промежутка [149] и измерение с помощью информационно-измерительной системы АНП-2 коротких замыканий с последующей статистической обработкой получаемых результатов.

Данные, полученные с помощью системы АНП-2 (рис. 176), показывают, что на прямой полярности средние значения $\tau_{к.з}$ меньше, чем на обратной. Однако по виду гистограмм $\tau_{к.з}$ (рис. 177) можно сделать вывод о нерегулярности переноса капель электродного металла в этих условиях: параметр $\tau^{ср}_{к.з}$ принимает самые разные значения примерно с одинаковой вероятностью. В то же время на обратной полярности перенос металла сопровождается небольшими отклонениями параметра $\tau_{к.з}$ от среднего значения (см. рис. 177), что говорит о бо́льшей регулярности перехода капель электродного металла с торца электрода в сварочную ванну.

Данные, полученные с помощью рентгенокиносъемки дугового промежутка [148], позволяют дополнить и объяснить приведенные выше результаты. Из рис. 178 видно, что средняя масса переносимой части капли $m^{ср}_{п}$ на прямой полярности несколько ниже, чем на обратной. Это явление связано с поведением катодного пятна. Фториды в покрытии способствуют беспорядочному его перемещению по поверхности капли. Высокая плотность тока в катодном пятне вызывает появление сил, препятствующих отрыву капли. Благодаря блужданию пятна отталкивающие силы как бы «раскачивают» каплю, чашечка покрытия не позволяет ей вытесниться в сторону. В результате от капли отделяются сравнительно мелкие частицы, наблюдается повышенное разбрызгивание электродного металла.

При сварке переменным током [1] на характер перетекания капель металла оказывает влияние синусоидальная форма изменения тока сварки. Так, если короткие замыкания длятся более 10 мс, то ток сварки за этот временной промежуток дважды понижается до нуля.

Как это отражается на значении показателя $\tau_{к.з}$, видно из рис. 179. Гистограммы параметра $\tau_{к.з}$ имеют две и даже три моды (двух-, трехмодальные распределения плотностей вероятностей) с координатами при $\tau_{к.з}$, равными 5, 15 и 25 мс. С увеличением тока сварки вторая и третья моды сглаживаются (см. рис. 179, *б*, *в*).

[1] Сварка от трансформатора СТШ-500/80 ($U_{х.х} = 80$ В).

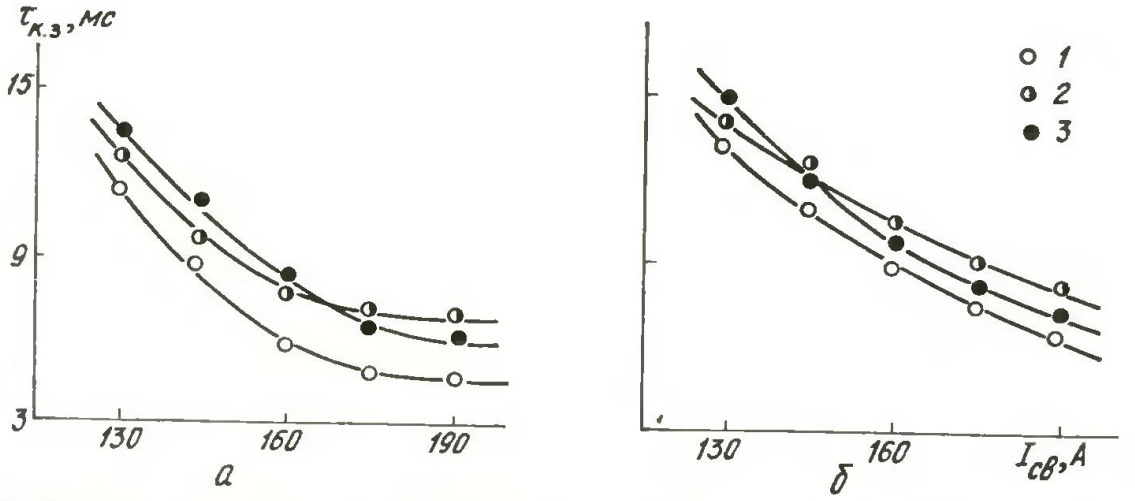


Рис. 176. Зависимость длительности коротких замыканий от рода и полярности тока при сварке электродами УОНИ-13/55 (*а*) и АНО-11 (*б*) ($d_э = 4$ мм):
1 — прямая полярность; *2* — обратная полярность; *3* — переменный ток.

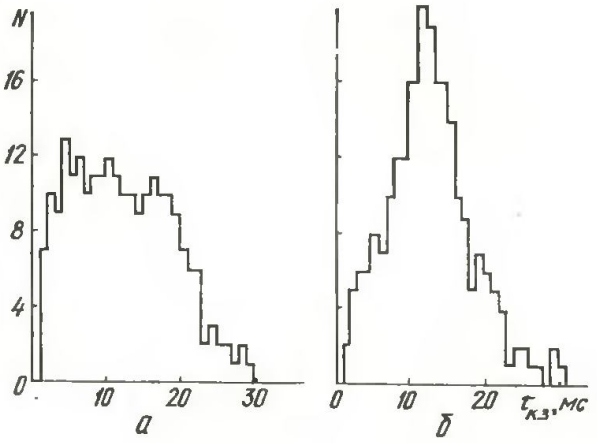


Рис. 177. Зависимость характера переноса металла от полярности тока при сварке постоянным током электродами УОНИ-13/55 ($d_э = 4$ мм, $I_{св} = 130$ А):

а — прямая полярность, $\tau_{к.з}^{ср} = 11{,}6$ мс, $\sigma_{\tau_{к.з}} = 7{,}2$ мс; *б* — обратная, $\tau_{к.з}^{рс} = 12{,}8$ мс, $\sigma\tau_{к.з} = 5$ мс.

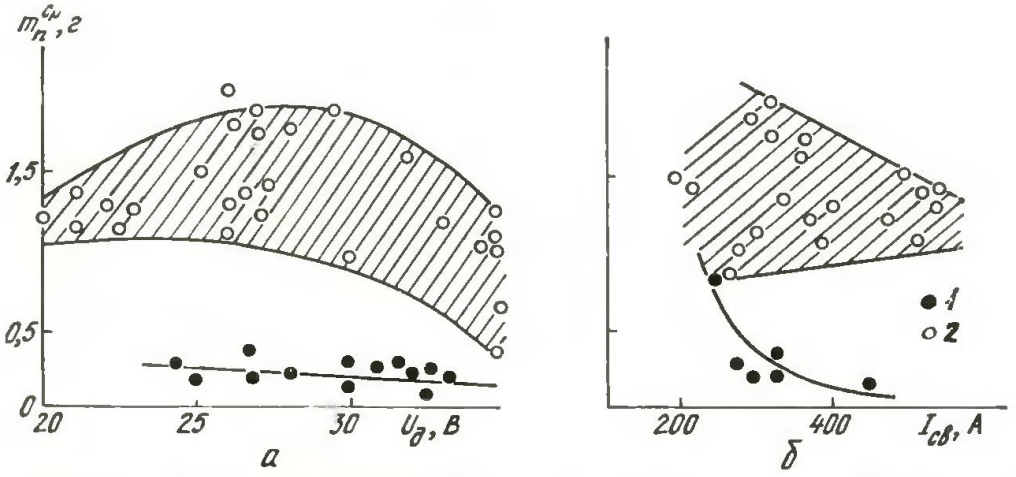


Рис. 178. Зависимость массы переходящих капель от полярности тока при изменении напряжения дуги (*а*) и режима сварки (*б*), электроды УОНИ-13/45, $d_э = 8$ мм:
1 — прямая полярность; *2* — обратная.

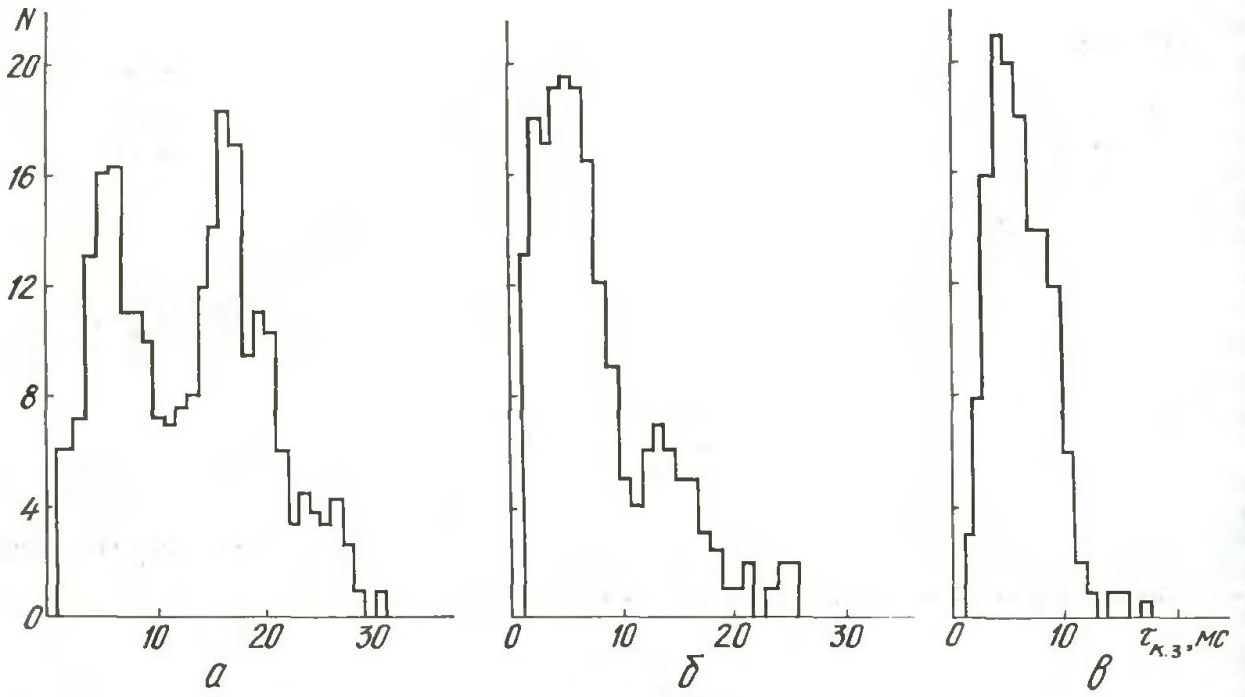


Рис. 179. Зависимость характера переноса металла от тока при сварке переменным током электродами УОНИ-13/55, $d_э = 4$ мм: *а* — $I_{св} = 130$ А, $\tau^{ср}_{к.з} = 41{,}5$ мс, $\sigma_{\tau_{к.з}} = 7{,}4$ мс; *б* — $I_{св} = 130$ А, $\tau^{ср}_{к.з} = 7{,}8$ мс, $\sigma_{\tau_{к.з}} = 4{,}2$ мс; *в* — $I_{св} = 200$ А, $\tau_{к.з} = 6{,}1$ мс, $\sigma_{\tau_{к.с}} = 2{,}9$ мс.

Гистограммы параметра $\tau_{к.з}$ для других марок электродов имеют вид, аналогичный показанным на рис. 179. При этом, если электрод характеризуется более крупнокапельным переносом металла по сравнению с электродами марки УОНИ-13/55, то на гистограммах параметра $\tau_{к.з}$ вторая и третья моды просматриваются более четко даже при $I_{св} = 160...180$ А (для электродов диаметром 4 мм). Для электродов, характеризующихся относительно мелкокапельным переносом, вторая и третья моды выражены слабее либо вообще отсутствуют. Это говорит о том, что капли переходят в ванну за время меньшее 10 мс.

Для анализа полученных данных проведено шлейфовое осциллографирование напряжения дуги переменного тока. Установлено, что чаще всего короткие замыкания начинаются в момент смены полярности, а заканчиваются в середине полупериода, причем с увеличением тока сварки эта тенденция проявляется четче. Так, для электродов марки УОНИ-13/45 при токе сварки 180 А около 80 % всех коротких замыканий начинается при смене полярности. Из них примерно 90 % — в момент перехода от прямой полярности к обратной (рис. 180). Результаты, полученные с помощью шлейфового осциллографирования, можно объяснить следующим образом. При горении дуги капля металла поджимается вверх, кроме других, силой реактивного давления паров. В момент смены полярности дуга гаснет, воздействие этой силы на каплю уменьшается и она сближается с ванной металла вплоть до соприкосновения, которое, естественно, происходит при условии достижения каплей размеров, достаточных для образования перемычки.

На прямой полярности, когда силовое давление дуги на каплю металла выше

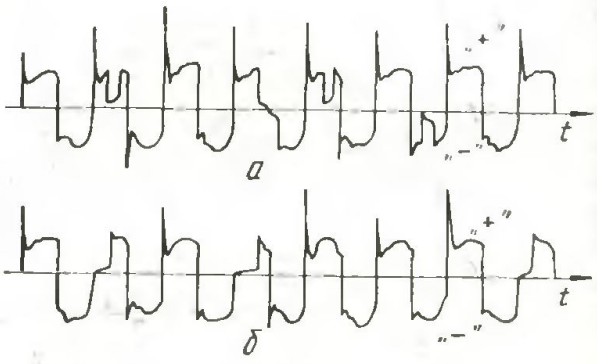


Рис. 180. Зависимость характера переноса металла от тока при сварке электродами УОНИ-13/45, $d_э = 4$ мм:
а — $I_{св} = 140$ А; *б* — $I_{св} = 190$ А.

Таблица 57. **Состав покрытия электродов, % (по массе)**

Составляющая покрытия	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7	В8	В9	В10
Мрамор	50	49	48	47	46	45	40	35	30	25
Плавиковый шпат	0	1	2	3	4	5	10	15	20	25
Ферросилиций	15	15	14	14	13	13	11	10	9	8
Ферромарганец	5	5	5	5	5	5	4,5	4,5	4	4
Железный порошок	30	30	31	31	32	32	34,5	35,5	37	38

[238], последняя сильнее поджимается вверх и поэтому с бóльшим ускорением движется к ванне в момент погасания дуги, что увеличивает вероятность касания каплей поверхности ванны. Этим объясняется тот факт, что короткие замыкания начинаются преимущественно при смене полярности от прямой к обратной.

Таким образом, причина того, что моды гистограмм $\tau_{к.з}$ (см. рис. 179) имеют координаты 5, 15 и 25 мс, заключается в том, что короткие замыкания начинаются при смене полярности, а заканчиваются в середине полупериода, когда через перемычку металла протекает максимальный ток короткого замыкания. При этом в показанных на рис. 180 условиях короткие замыкания чаще оканчиваются в первом полупериоде, поэтому мода с координатой 5 мс выражена сильнее. Короткие замыкания, окончившиеся во втором и третьем полупериодах (длительность которых в среднем 15 и 25 мс), наблюдаются реже.

Влияние соотношения мрамора и плавикового шпата в покрытии. Эксперименты проводили с электродами серии В1—В10 с различным соотношением мрамора и плавикового шпата в покрытии. Суммарное содержание $CaCO_3$ и CaF_2 во всех случаях оставалось постоянным и составляло 50 %. Составы покрытий опытных электродов приведены в табл. 57, результаты исследований — в табл. 58 и на рис. 181, 182. Видно (см. рис. 181), что с повышением содержания CaF_2 в покрытии увеличивается длительность коротких замыканий и интервалов между ними, перенос металла при этом становится более крупнокапельным. Соотношение $CaF_2/CaCO_3$, равное $^2/_3$, оказывается «критическим», так как $\tau_{к.з}$ принимает значения, при которых происходит «примерзание» электрода к изделию. Опасность «примерзания» электрода при этом возрастает еще и потому, что увеличиваются размеры капель, постоянно существующих на торце электрода (см. рис. 182).

Известно [50], что фторидные шлаки отличаются легкоплавкостью. Поэтому с увеличением содержания CaF_2 в покрытии уменьшается размер $h_{вт}$ втулочки из покрытия (см. рис. 182). Сочетание неглубокой втулки и крупной капли, как показывает практика, является весьма неблагоприятным с точки зрения «примерзания» электрода, затрудняющего сварку на малых режимах.

Влияние содержания CaF_2 в шлаках. На рис. 183 представлены данные о длительности коротких замыканий для ряда марок электродов с покрытием основного вида. Как следует из полученных результатов, с ростом содержания CaF_2 в шлаках, образующихся при плавлении покрытия, длительность коротких замыканий возрастает. По-видимому, CaF_2 изменяет поверхностные свойства шлака, увеличивая межфазное натяжение на границе шлак — металл и в связи с этим

Таблица 58. **Показатели переноса металла при сварке электродами серии В1—В10.**

Электрод	CaF_2, %	$\tau_{к.з}$, мс	$T_{к.з}$, мс	$\sigma_{\tau_{к.з}}$, мс	K, %
В1	0	4,5	153	1,9	2,83
В2	1	4,8	158	2,0	2,95
В3	2	5,1	149	1,9	3,33
В4	3	5,7	143	2,6	3,84
В5	4	6,0	168	2,7	3,45
В6	5	6,2	173	3,1	3,50
В7	10	13,3	244	3,4	5,20
В8	15	16,0	319	3,5	4,81
В9	20	17,9	347	4,5	4,93
В10	25	20,4	416	6,8	4,70

Примечание. $I_{св} = 110$ А, $U_д = 23...25$ В, постоянный ток, обратная полярность.

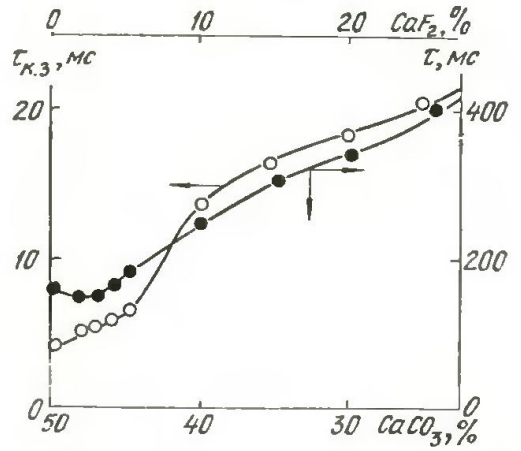


Рис. 181. Зависимость длительности коротких замыканий и интервала между ними от соотношения CaO_3 и CaF_2 в покрытии, $d_э = 4$ мм, $I_{св} = 110$ А.

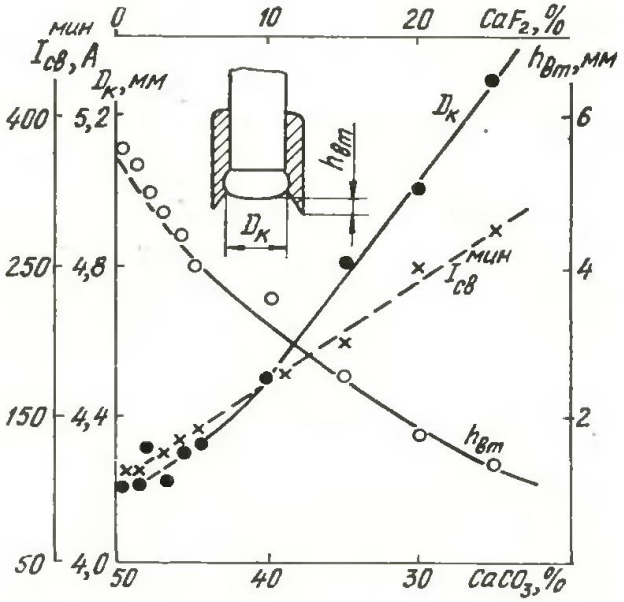


Рис. 182. Зависимость диаметра капли на торце электрода, глубины втулочки из покрытия и минимально допустимого тока сварки от соотношения CaO_3 и CaF_2 в покрытии, $d_э = 4$ мм [162, 163].

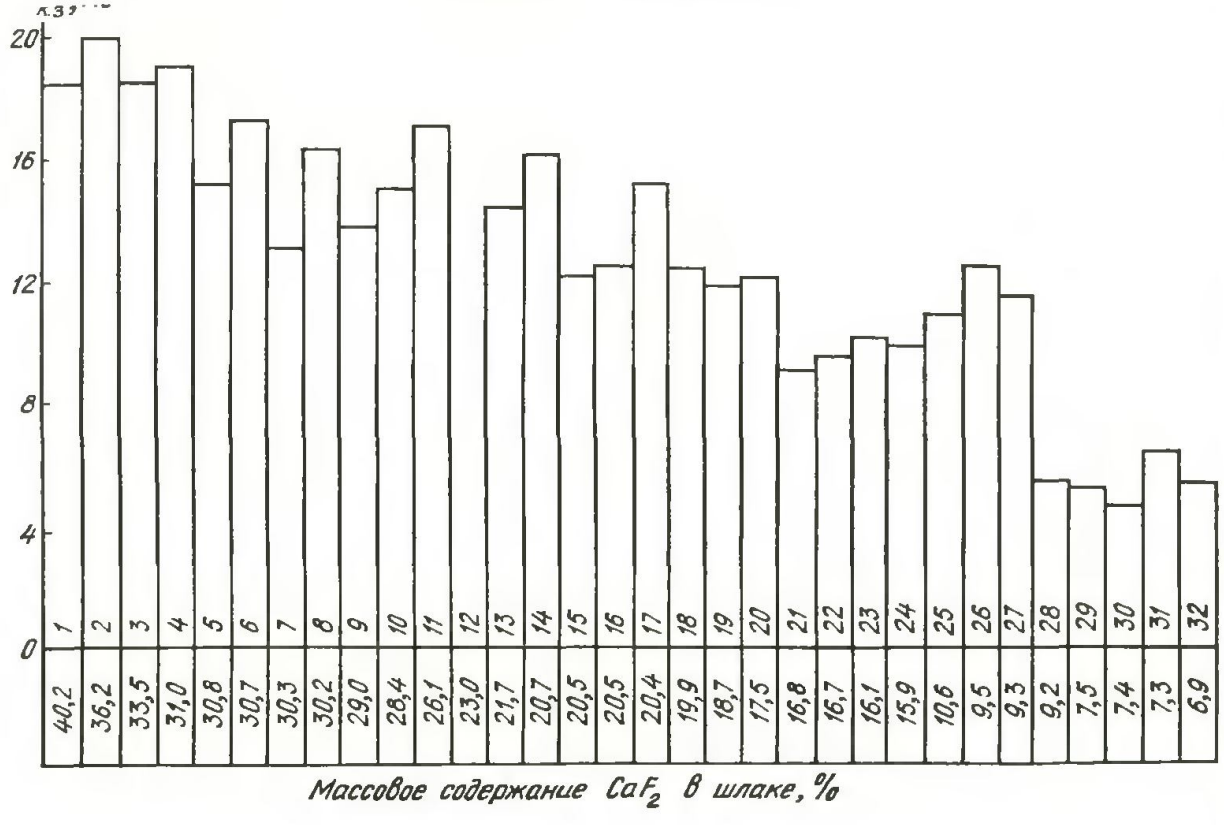
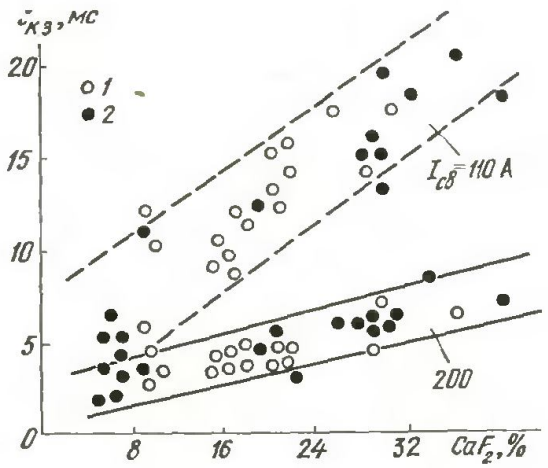
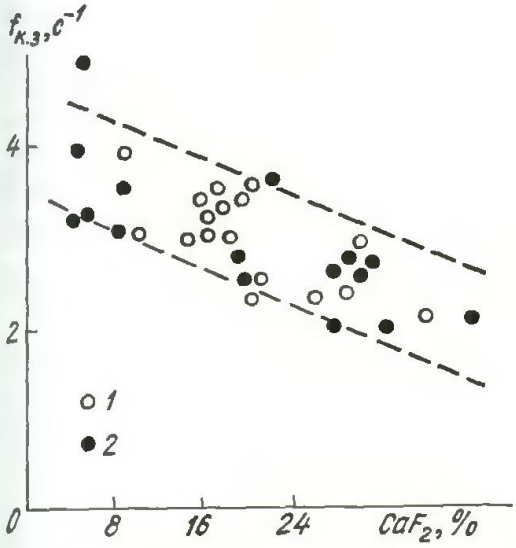


Рис. 183. Зависимость длительности коротких замыканий от содержания CaF_2 в шлаках при сварке электродами отечественного и зарубежного производства ($d_э = 4$ мм, $I_{св} = 110$ А) [153, 154].

Рис. 184. Зависимость длительности коротких замыканий от содержания CaF_2 в шлаках при сварке электродами отечественного (*1*) и зарубежного (*2*) производства ($d_э = 4$ мм) [162].





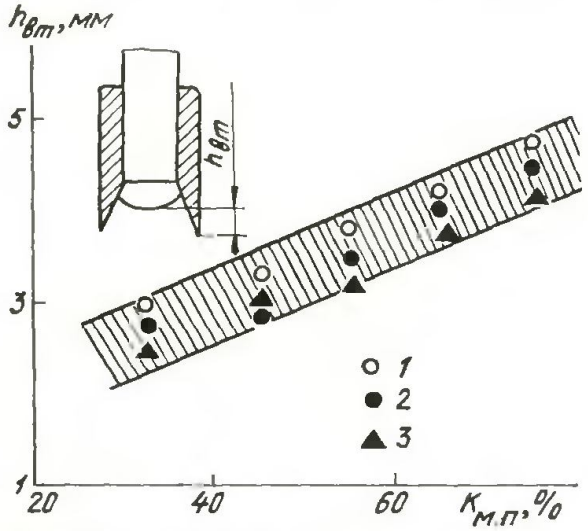


Рис. 185. Зависимость частоты коротких замыканий от содержания CaF_2 в шлаках при сварке электродами отечественного (*1*) и зарубежного (*2*) производства ($d_э = 4$ мм, $I_{св} = 110$ А).

Рис. 186. Зависимость глубины втулки от коэффициента массы покрытия:
— $I_{св} = 110$ А; *2* — $I_{св} = 160$ А; *3* — $I_{св} = 200$ А.

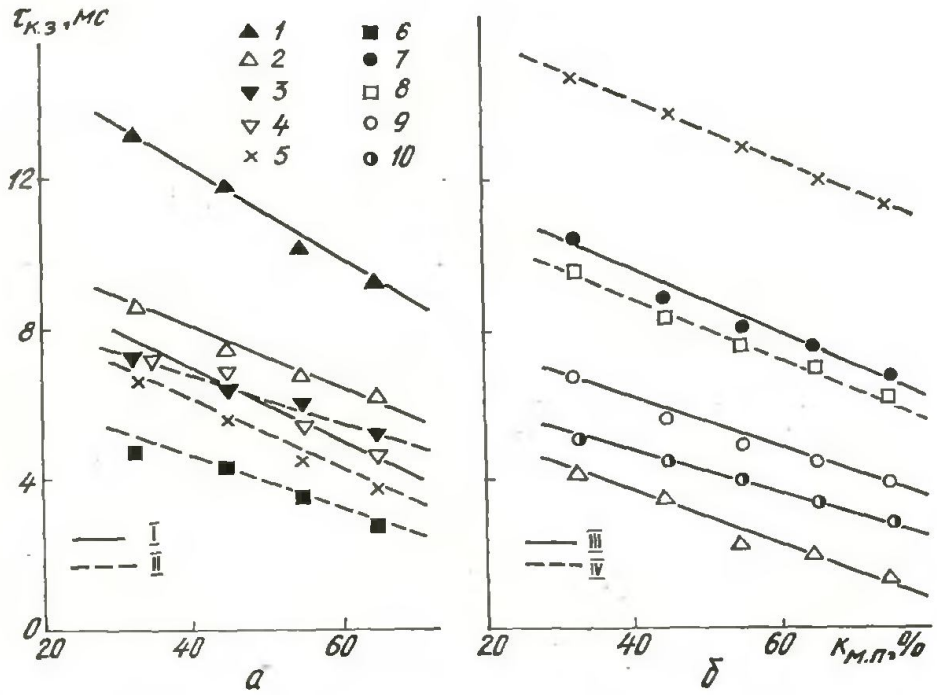


Рис. 187. Зависимость длительности коротких замыканий от коэффициента массы покрытия при сварке электродами диаметром 3 и 5 мм (*а*) и 4 мм (*б*):
а — нижнее положение (*I* — $d_э = 5$ мм; *II* — $d_э = 3$ мм); *б* — *III* — нижнее; *IV* — потолочное положение; *1* — $I_{св} = 160$ А; *2* — 200 А; *3* — 80 А; *4* — 240 А; *5* — 100 А; *6* — 120 А; *7* — 110 А; *8*, *9* — 140 А; *10* — 170 А.

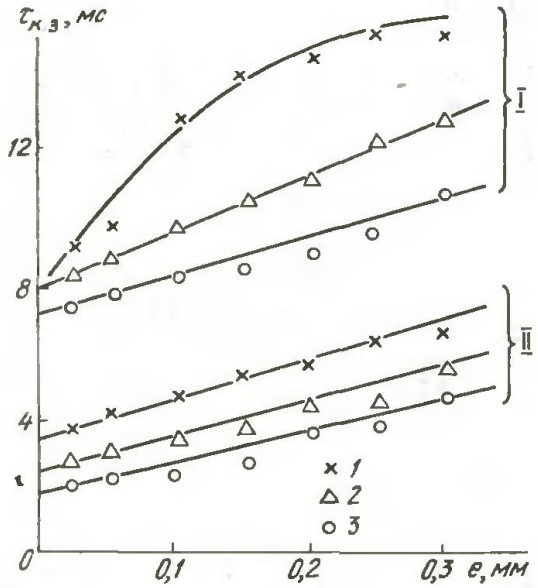


Рис. 188. Зависимость длительности коротких замыканий от эксцентричности покрытия:
I — $I_{св}$ = 110 А; *II* — $I_{св}$ = 180 А; *1* — $K_{м.п}$ = = 35 %; *2* — $K_{м.п}$ = 45 %; *3* — $K_{м.п}$ = 55 % [163]

способствуя укрупнению переходящих капель [12]. Кроме того CaF_2, как указывалось выше, может изменять характеристики столба дуги и приэлектродных областей. Как показывает анализ, наиболее крупнокапельным переносом металла характеризуются универсальные электроды с большим количеством CaF_2 в покрытии, наименее крупнокапельным — электроды с незначительным содержанием CaF_2 (электроды *28*, *29*, *30*), а также электроды с двухслойным покрытием с CaF_2 в наружном слое (*12*).

На рис. 184 приведена зависимость длительности коротких замыканий от содержания CaF_2 в шлаках для двух режимов сварки (110 и 200 А), полученная В. Д. Макаренко. Влияние содержания CaF_2 в шлаках на частоту коротких замыканий показано на рис. 185. Видно, что на повышенных режимах сварки ($I_{св}$ = = 200 А) величина $\tau_{к.з}$ незначительно изменяется в зависимости от содержания CaF_2 в шлаке (разность между крайними значениями $\tau_{к.з}$ в этом случае составляет около 6 мс). С повышением тока в балансе сил, действующих на каплю, основную роль начинает играть аэродинамическая сила и реактивное давление паров, которые и определяют характер переноса металла. Сила поверхностного натяжения, также зависящая от содержания CaF_2 в шлаке, с увеличением тока уменьшается (см. табл. 55).

Влияние коэффициента массы (толщины) и эксцентричности покрытия [35, 163, 293, 62]. Как показано выше, электроды с основным покрытием характеризуются крупнокапельным переносом металла и небольшой втулкой из нерасплавившегося покрытия, что часто вызывает «примерзание» электрода к изделию, в особенности при сварке на малых режимах. Удлинение дуги устраняет этот недостаток, но появляется опасность возникновения пористости в сварных швах [148, 50]. Можно предположить, что при неблагоприятном с точки зрения переноса металла содержании CaF_2 в покрытии, углубив каким-то образом втулку, можно увеличить расстояние между каплей и ванной и снизить вероятность «примерзания» электрода.

Увеличения глубины втулки можно достичь изменением композиции покрытия (например, увеличив содержание $CaCO_3$ или отношение $CaCO_3/CaF_2$ (см. рис. 182)), но при этом часто теряется универсальность электрода. К тому же варьирование составом покрытия возможно в определенных пределах, так как может вызвать ухудшение других характеристик электродов, в частности металлургических. Имеется еще один путь — увеличение коэффициента массы (или толщины) покрытия. При этом из-за увеличения глубины втулки из покрытия (рис. 186) снижается опасность «примерзания» электрода к изделию.

Для исследования влияния коэффициента массы покрытия на характер переноса металла использовали электроды с покрытием на базе электродов УОНИ-13/55 диаметром 3, 4 и 5 мм с различной его толщиной. Связующим при изготовлении электродов служило калиево-натриевое стекло плотностью 1,5 г/см^3 и с модулем 2,78. Сварку выполняли на постоянном токе обратной полярности.

На рис. 187 представлены данные о длительности коротких замыканий в зависимости от $K_{м.п}$ и режима сварки. Величина $\tau_{к.з}$ с увеличением толщины покрытия уменьшается при сварке как в нижнем, так и в потолочном положениях. Полученные данные можно объяснить тем,

Таблица 59. **Среднеквадратическое отклонение длительности коротких замыканий в зависимости от величины эксцентричности и коэффициента массы покрытия [163]**

e, мм	$K_{м.п}$, %			e, мм	$K_{м.п}$, %		
	35	45	55		35	45	55
0,02	4,3/2,8	4/2,5	3,8/2,2	0,20	6,5/3	6/3,3	5/2,7
0,05	4,9/2,8	4,3/2,7	4/2,5	0,25	7,1/3,2	6,2/3,5	4,9/2,8
0,10	5,5/2,9	4,8/2,8	4,4/2,4	0,30	7,4/3,3	6,7/3,6	5,2/2,9
0,15	6,1/3	5,1/3	4,6/2,7				

Примечание. Перед чертой — значения $\sigma_{\tau_{к.з}}$ при $I_{св} = 110$ А, за чертой — при $I_{св} = 170$ А.

что, во-первых, с увеличением $K_{м.п}$ возрастает глубина втулочки из неоплавившегося покрытия, которая придает бóльшую направленность газовому потоку, «срывающему» капли с торца электрода. Во-вторых, меньшая теплопроводность более толстого покрытия и экранирующее действие втулочки на конце плавящегося стержня способствуют выделению большей тепловой мощности в приэлектродной области [83], что вызывает повышение температуры капель, усиление взаимодействия жидкого металла капли с покрытием [50] и снижение поверхностного натяжения на границе шлак — металл [50]. Рассмотренные факторы способствуют уменьшению размеров переходящих капель (снижению $\tau_{к.з}$).

Важное значение имеет и то, что с возрастанием глубины втулочки увеличивается расстояние от капли на торце электрода до ванны, т. е. снижается вероятность «примерзания» электрода к изделию даже при весьма крупнокапельном переносе металла.

В то же время необходимо отметить, что с увеличением $K_{м.п}$ электродов выше определенного предела затрудняется процесс сварки в пространственных положениях шва, отличных от нижнего. Это связано с образованием излишне большого количества шлака, шунтирующего дугу. Кроме того, очень толстым электродом неудобно манипулировать: при этом затрудняется доступ к корню тавровых и стыковых швов. Оптимальным с точки зрения переноса металла коэффициентом массы покрытия для электродов исследованного состава является $K_{м.п} = (60 \pm \pm 5)$ %.

Характер переноса металла зависит также и от эксцентричности (разнотолщинности) электродного покрытия (рис. 188). С ростом эксцентричности покрытия длительность коротких замыканий увеличивается, т. е. перенос металла становится более крупнокапельным. При этом снижается и устойчивость процесса переноса, о чем свидетельствует повышение значения среднеквадратического отклонения длительности коротких замыканий от их средней величины (табл. 59). Повышение среднего значения $\tau_{к.з}$ вызвано тем, что с ростом величины e увеличивается длина образующегося «козырька» из покрытия на торце электрода, способствующего неравномерному распределению газового потока вокруг капли расплавленного металла (рис. 189). Часть газового потока с противоположной «козырьку» стороны расходуется неэффективно, вследствие чего ухудшаются условия отрыва капель.

Влияние диаметра электрода и пространственного положения шва [166]. Для экспериментов использовали промышленные электроды диаметром 3—6 мм с покрытием основного вида, обеспечивающие относительно крупнокапельный (электроды марки СМ-11) и мелкокапельный перенос (УОНИ-13/55 и АНО-Д [167]). Сварку выполняли от выпрямителя ВДУ-504 на постоянном токе обратной полярности. Результаты экспериментов представлены на рис. 190 и 191. Видно, что с увеличением диаметра электрода длительность коротких замыканий и диаметр переходящих капель (рассчитанный по эмпирической формуле $d_к = 0{,}2\ \tau_{к.з}$) монотонно возрастают независимо от плотности тока. Установленная зависимость $\tau_{к.з}(d_к)$ от диаметра электрода

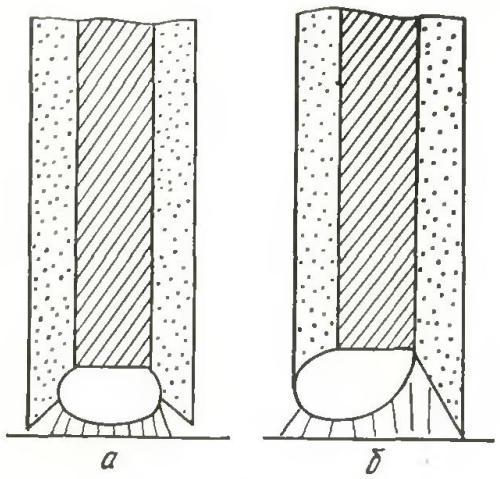


Рис. 189. Схема плавления электродов с концентричным (*а*) и эксцентричным (*б*) покрытиями.

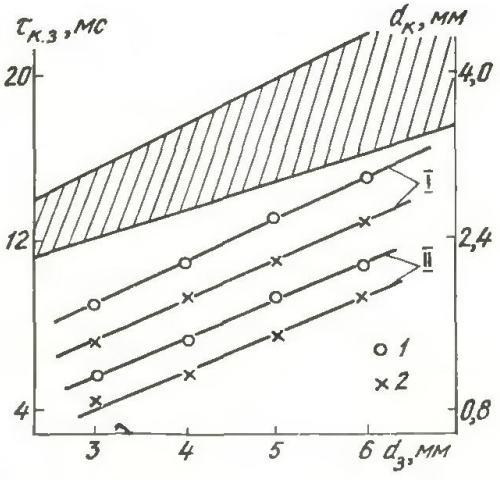


Рис. 190. Зависимость длительности коротких замыканий и расчетного диаметра переходящих капель от диаметра электрода при сварке в нижнем положении:

I — электроды СМ-11; *II* — электроды УОНИ-13/55; *1* — j = 11 А/мм²; *2* — j = 14 А/мм² [166]

обусловлена тем, что с увеличением $d_э$ возрастает сила поверхностного натяжения [135], удерживающая каплю на торце электрода.

Необходимо отметить, что темп роста величин $\tau_{к.з}$ и $d_к$, определяемый углом наклона прямых $\tau_{к.з} = f(d_э)$ и $d_к = f(d_э)$ к оси абсцисс, по мере увеличения диаметра электрода примерно постоянен для обоих исследованных электродов независимо от характера переноса металла (мелко- или крупнокапельный). В то же время в случае постоянной плотности тока с увеличением $d_э$ длительность коротких замыканий приближается к

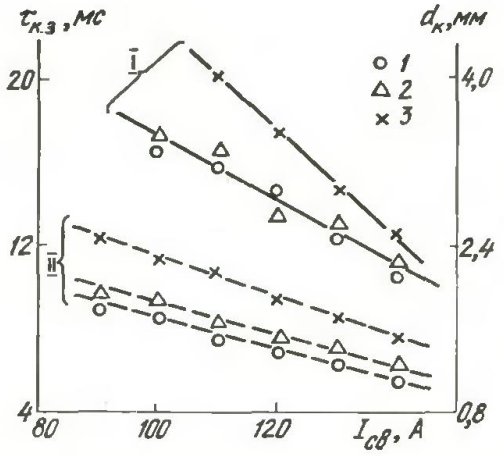


Рис. 191. Зависимость длительности коротких замыканий и расчетного диаметра переходящих капель от тока и положения шва в пространстве ($d_э$ = 4 мм):

I — электроды СМ-11; *II* — электроды АНО-Д; *1* — нижнее положение; *2* — вертикальное; *3* — потолочное [166]

критической (заштрихованная зона на рис. 190), при которой повышается вероятность «примерзания» электрода к изделию. Например, как известно [36], для электродов диаметром 4 мм величина $\tau^{кр}_{к.з}$, повышение которой вызывает «примерзание» электрода, составляет (16 ± ± 2) мс.

Эксперименты показали, что характер переноса металла существенно зависит и от пространственного положения шва. Длительность коротких замыканий увеличивается при переходе от нижнего положения сварного шва к потолочному (рис. 191). Величина $\tau_{к.з}$ при сварке в нижнем и вертикальном положениях отличается незначительно. Увеличение длительности коротких замыканий при переходе от положения нижнего к потолочному объясняется тем, что в потолочном положении в отличие от нижнего сила тяжести препятствует переходу капли в сварочную ванну, поэтому капля приобретает несколько сплюснутую по высоте форму. Последнее, вероятно, ухудшает условия подвода тепла к части металла капли, удаленной от оси дуги (центр активного пятна). Одновременно возрастает поверхность контакта электродного металла с относительно холодным покрытием. Эти факторы, по всей вероятности, могут приводить к снижению температуры нагрева металла капель, из-за

чего можно ожидать увеличения силы его поверхностного натяжения [135], удерживающей капли на торце электрода. Анализ данных, приведенных на рис. 191, показывает, что электроды, отличающиеся мелкокапельным переносом металла (АНО-Д), обеспечивают меньшую зависимость $\tau_{к.з}$ и $d_к$ от величины сварочного тока, чем электроды с крупнокапельным переносом (СМ-11). Так, электродами АНО-Д диаметром 4 мм можно беспрепятственно выполнять сварку в потолочном положении на токе 90 А, не опасаясь «примерзания» электрода.

Влияние типа и состава связующего [170]. С целью повышения стабильности горения дуги при сварке на переменном токе электродами с основным покрытием в зону дуги вводят соединения элементов, обладающих низким потенциалом ионизации. При этом одним из наиболее рациональных путей является использование в покрытии связующего (жидкого стекла), содержащего соединения щелочных элементов. Изучалась зависимость переноса электродного металла электродов с основным покрытием от типа, состава и силикатного модуля жидкого стекла. Применяли опытные электроды диаметром 4 мм ($K_{м.п} = 40$ %) с покрытием, аналогичные электродам УОНИ-13/55, изготовленные с использованием литиевого, цезиевого, натриевого, калиевого и комбинированного (натриево-калиевого) жидкого стекла.

Перенос металла исследовали в процессе сварки на постоянном токе при обратной полярности. Кроме среднестатистической величины $\tau_{к.з}$, перенос металла оценивали также по среднеквадратическому отклонению длительности коротких замыканий $\sigma_{\tau_{к.з}}$, характеризующему, как указывалось выше, разброс значений $\tau_{к.з}$ относительно наиболее вероятного значения.

В первой серии опытов рассматривали зависимость характеристик переноса металла от типа жидкого стекла. Использовали жидкие стекла с примерно одинаковыми силикатными модулями (молярное отношение кремнезема к щелочным оксидам). Во второй серии изучали влияние состава комбинированного жидкого

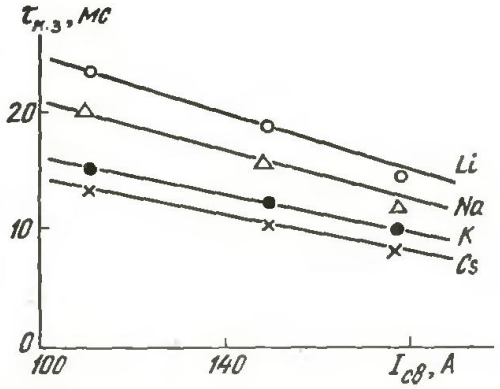


Рис. 192. Зависимость длительности коротких замыканий от тока при сварке электродами с различными связующими в покрытии [170].

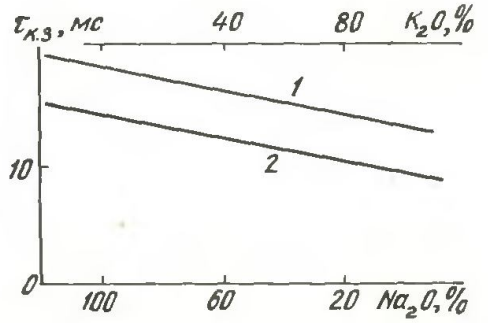


Рис. 193. Зависимость длительности коротких замыканий от соотношения Na_2O и K_2O в комбинированном жидком стекле:
1 — $I_{св} = 110$ А; *2* — $I_{св} = 180$ А [170].

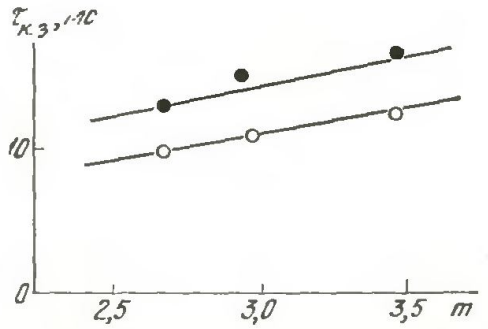


Рис. 194. Зависимость длительности коротких замыканий от модуля жидкого стекла: черные точки — $I_{св} = 110$ А, светлые — 180 А [176].

стекла (соотношения Na_2O/K_2O) на характер переноса металла. В третьей серии определяли влияние модуля натриево-калиевого ($Na_2O/K_2O = 70/30$) жидкого стекла на перенос металла.

Результаты экспериментов приведены на рис. 192—194. Как следует из полученных результатов, тип жидкого стекла, применяемого в покрытии, оказывает заметное влияние на характер переноса

Таблица 60. **Состав покрытия электродов серии А, % (по массе)**

Составляющая покрытия	А1	А2	А3	А4
Мрамор	55	45	35	25
Плавиковый шпат	5	15	25	35
Ферросилиций	13	11	9	7
Ферромарганец	5	5	4	4
Рутил	4	4	4	4
Железный порошок	18	20	23	25

Таблица 61. **Состав покрытия электродов серии АД, % (по массе)**

Составляющая покрытия	АД1	АД2	АД3	АД4
Мрамор	60/50	60/30	60/10	50/—
Плавиковый шпат	—/10	—/30	—/50	—/70
Ферросилиций	13/13	11/11	9/9	7/7
Ферромарганец	5/5	5/5	4/4	4/4
Рутил	4/4	4/4	4/4	4/4
Железный порошок	18/18	20/20	23/23	35/15

Примечание. Перед чертой — данные для внутреннего слоя покрытия, за чертой — для наружного его слоя

металла (рис. 192). Так, при переходе от литиевого к цезиевому жидкому стеклу длительность коротких замыканий снижается примерно на 45 %, что свидетельствует об измельчении электродных капель, переходящих в сварочную ванну. Последнее, как отмечалось выше, играет важную роль в повышении качества металла шва, особенно при сварке в монтажных условиях.

Аналогичное влияние на перенос металла оказывает постепенное увеличение массовой доли оксидов калия (соотношения K_2O/Na_2O) в составе комбинированного жидкого стекла (рис. 193).

Снижение модуля жидкого стекла также способствует измельчению капель электродного металла — снижению величины $\tau_{к.з}$ (см. рис. 194).

Улучшение характера переноса металла (снижение $\tau_{к.з}$) при переходе от литиевого к цезиевому жидкому стеклу и увеличении соотношения K_2O/Na_2O в составе комбинированного стекла связано с известным влиянием соединений легкоионизируемых элементов на параметры столба дуги. При введении в межэлектродный промежуток элементов с низким потенциалом ионизации или их соединений возрастает проводимость периферийных областей дуги. Физически это проявляется в расширении столба дуги и, следовательно, активных пятен. Последнее же должно приводить к уменьшению сил, препятствующих отрыву капель (осевая составляющая электромагнитной силы, сила реактивного давления паров) [45], и способствовать измельчению переходящих капель. Кроме того, вследствие ослабления контрагирования столба дуги и активных пятен можно ожидать также снижения поверхностного натяжения металла капель. Передача тепла электродному металлу осуществляется в основном через активные пятна дуги. Поэтому по мере уменьшения степени контрагирования (расширения активного пятна) температура нагрева металла капель должна повышаться, что и приводит к уменьшению его поверхностного натяжения.

Влияние конструкции и состава покрытия. Эффективность применения двухслойного покрытия. В исследованиях использовали электроды серии А (табл. 60) с переменным соотношением $CaCO_3/CaF_2$ в покрытии. В электродах двухслойной конструкции (серия АД, табл. 61) фторид кальция вводился толь-

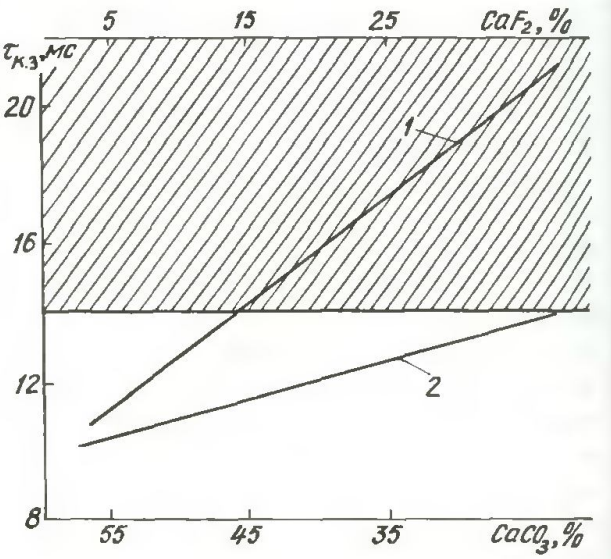


Рис. 195. Зависимость длительности коротких замыканий от соотношения $CaCO_3/CaF_2$ при сварке в потолочном положении электродами с однослойным (*1*) и двухслойным (*2*) покрытиями постоянным током обратной полярности, $I_{св}$ = = 110 А (заштрихована область «примерзания» электрода).

Таблица 62. **Состав покрытия электродов с различной газообразующей основой, % (по массе)**

Составляющая покрытия	Б1	Б1.1	Б1.2	Б2	Б2.1	Б2.2	Б3	Б3.1	Б3.2
Мрамор	—	—/—	—/—	15	30/—	—/30	30	50/10	31/29
Плавиковый шпат	15	—/30	30/—	13,5	—/27	27/—	12	—/24	24/—
Перовскит	60	60/60	60/60	37	37/37	37/37	11	11/11	11/11
Рутил	—	—/—	—/—	9,5	9,5/9,5	9,5/9,5	22	22/22	22/22
Ферромарганец	6	6/6	6/6	6	6/6	6/6	6	6/6	6/6
Ферросилиций	4	4/4	4/4	5	5/5	5/5	6	6/6	6/6
Железный порошок	15	30/—	—/30	14	12,5/15,5	15,5/12,5	13	5/21	—/26

Примечания: 1. Диаметр стержней электродов 4 мм, диаметр калибрующей втулки 6,7 мм. 2. Соотношение площадей внутреннего и наружного слоев у электродов с двухслойным покрытием Sn = 1:1. 3. Связующее — натриево-калиевое жидкое стекло. 4. В состав покрытия всех электродов входило по 1 % КМЦ. 5. Перед чертой — данные для внутреннего слоя покрытия, за чертой — данные для наружного его слоя

ко в наружный слой покрытия. При этом общее содержание всех компонентов в соответствующих двух- и однослойных электродах оставалось неизменным. Электроды изготавливали на натриево-калиевом жидком стекле, диаметр стержня — 4 мм, диаметр покрытия — 6,7 мм.

На рис. 195 представлена зависимость длительности коротких замыканий от соотношения $CaCO_3/CaF_2$ в электродном покрытии различной конструкции при сварке в потолочном положении, которое, как известно, наименее благоприятно для сварки [107, 213]. Заштрихованная зона соответствует критическим значениям $\tau_{к.з}$, при достижении которых резко возрастает вероятность «примерзания» электрода к изделию. Как видно, двухслойная конструкция покрытия (кривая *2*) позволяет повысить общее содержание CaF_2 в покрытии без увеличения опасности «примерзания» электрода по сравнению с обычными электродами (кривая *1*). Наибольшее влияние на характер переноса металла двухслойная конструкция покрытия оказывает при высоком общем содержании CaF_2 в покрытии. Это наглядно видно из приведенных ниже данных, где представлено соотношение длительности коротких замыканий при сварке электродами с обычным и двухслойным ($\tau^1_{к.з}/\tau^2_{к.з}$) покрытиями по мере увеличения в них соотношения $CaF_2/CaCO_3$:

$CaF_2/CaCO_3$	5/55	15/45	25/25	35/25
$\tau^1_{к.з}/\tau^2_{к.з}$	1,11	1,23	1,37	1,54

Из приведенных данных следует, что с точки зрения улучшения переноса металла эффективность влияния двухслойного покрытия, содержащего фторид в наружном слое, по сравнению с однослойным растет при увеличении общего содержания CaF_2 в электродном покрытии. Особенно заметны преимущества двухслойных покрытий с CaF_2 в наружном слое при соотношениях $CaCO_3/CaF_2$, близких к единице, желательных с металлургической точки зрения [110, 150]. В то же время при увеличении соотношения $CaF_2/CaCO_3$ в покрытии до величин более 25/35 $\tau_{к.з}$ приближается к критическим значениям ($\tau^{кр}_{к.з} \geqslant 14$ мс, см. рис. 195). Последнее повышает вероятность обрывов дуги из-за «примерзания» электрода к изделию.

Таблица 63. **Среднеквадратическое отклонение, мс, при сварке электродами серии Б**

Электрод	$CaCO_3/CaF_2$	$I_{св}$, А		
		120	150	180
Б1.2	0/0	6,4	5,6	4,7
Б2.2	15/0	6,0	5,2	4,5
Б3.2	30/0	5,8	4,4	4,0
Б1	0/50	6,2	4,9	3,9
Б2	15/50	6,1	4,7	3,8
Б3	30/50	5,5	4,1	3,3
Б1.1	0/100	5,9	4,4	3,4
Б2.1	15/100	5,8	4,3	3,1
Б3.1	30/100	5,2	3,8	2,9

Примечание. Перед чертой — общее содержание в покрытии, %, за чертой — относительное содержание в наружном его слое.

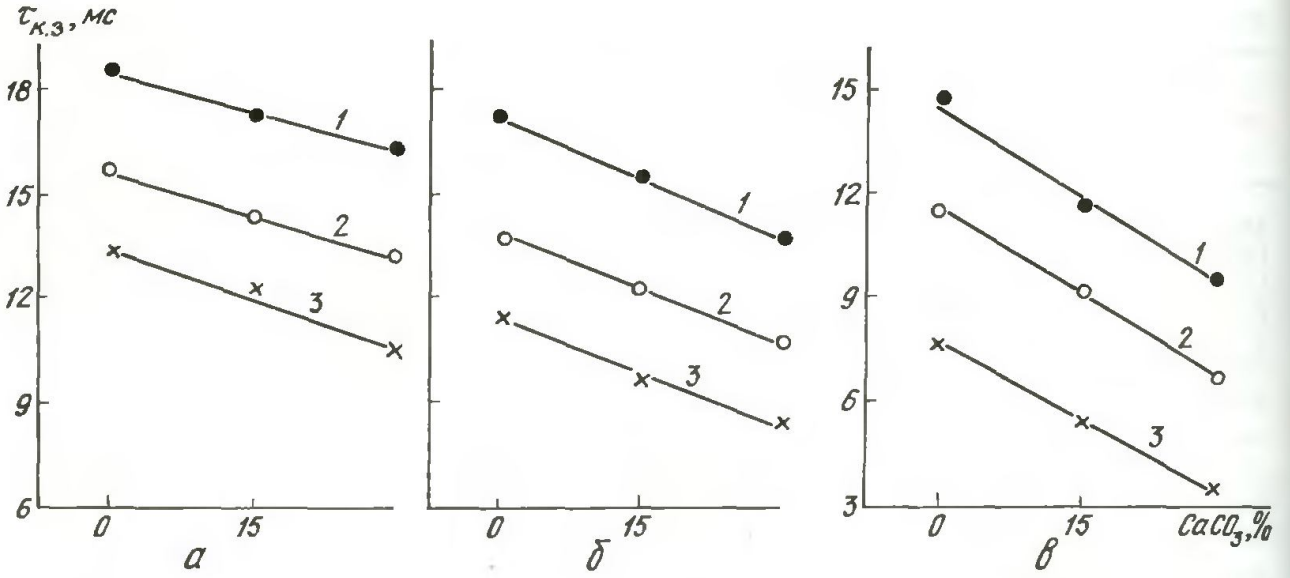


Рис. 196. Зависимость длительности коротких замыканий от содержания $CaCO_3$ в электродном покрытии:

а — CaF_2 во внутреннем слое; *б* — равномерно распределен по слоям; *в* — в наружном слое покрытия; *1* — $I_{св}$ = 120 А; *2* — 150 А; *3* — 180 А.

Влияние расположения CaF_2 во внутреннем и наружном слое покрытия. Во второй серии экспериментов сравнивали эффективность воздействия различного количества $CaCO_3$ и расположения CaF_2 в слоях покрытия на перенос электродного металла. Для этой цели изготовляли электроды, состав покрытия которых рассчитывался таким образом, чтобы, варьируя газообразующую составляющую покрытия (содержанием мрамора), не изменять состав получающегося при его плавлении шлака. В состав опытных электродов серии Б (табл. 62) вводили переменное количество мрамора ($CaCO_3$), рутила (TiO_2) и перовскита ($CaO \cdot TiO_2$). Для компенсации окисления металла шва газами, образующимися при диссоциации мрамора, в покрытии содержалось различное количество ферросилиция. Изготавливали обычное (индексы Б1—Б3) и двухслойное (индексы Б1.1—Б1.3 и Б2.1—Б2.3) покрытия с различным расположением CaF_2 в слоях. Металл, наплавленный опытными электродами, содержал 0,07—0,09 % C; 0,32—0,46 % Si и 0,96—1,15 % Mn. Шлак, образующийся при расплавлении электродов, имел близкий химический состав (содержание основных оксидов: 25—27,7 % CaO; 12,9—17,6 % CaF_2; 16,1—17,2 % SiO_2; 28—30,2 % TiO_2; 3,8—4,5 % MnO; 4,2—6 % Fe_2O_3; 1,5—1,8 % MgO; 0,7—1 % Al_2O_3; 0,8—1,1 % K_2O и 1—1,4 % Na_2O). Результаты исследований приведены в табл. 63 и на рис. 196.

Анализ полученных данных показывает, что по мере увеличения содержания мрамора в покрытии (электроды Б1—Б3) длительность коротких замыканий снижается, что свидетельствует об измельчении переходящих капель. Уменьшается при этом и среднеквадратическое отклонение длительности коротких замыканий, т. е. размер переходящих капель относительно стабилизируется (табл. 63).

Полученные данные можно объяснить тем, что по мере увеличения содержания $CaCO_3$ в покрытии растет парциальное давление CO_2 в атмосфере дуги, повышающее ее окислительную способность, что должно снижать поверхностное и межфазное натяжение [122, 225] на границе между шлаком и расплавленным металлом и способствовать уменьшению размеров переходящих электродных капель. Более существенную роль в изменении характера переноса металла, наблюдаемом по мере роста содержания мрамора в покрытии, играет увеличивающееся воздействие аэродинамической силы. При увеличении содержания $CaCO_3$ в покрытии углубляется втулочка на торце электрода и создается газовый поток, который способствует отрыву капель от торца электрода [158].

Размер переходящих капель электродного металла в значительной мере зависит

от положения CaF_2 относительно стержня электрода (см. рис. 165). Так, во всех случаях у электродов с двухслойным покрытием размер капель существенно уменьшается при вынесении фторида в наружный слой, о чем свидетельствует снижение длительности коротких замыканий при сварке. Введение фторида во внутренний слой покрытия приводит к обратному эффекту. Значения $\tau_{к.з}$ у обычных (однослойных) электродов находятся между величинами $\tau_{к.з}$ электродов с различным расположением CaF_2 в слоях.

Как видно из рис. 197, с увеличением содержания мрамора в электродном покрытии уменьшается длительность коротких замыканий, особенно когда применяется двухслойная конструкция покрытия и CaF_2 выносится в наружный слой. При этом повышается окислительная способность внутренней, контактирующей с каплей части покрытия из-за расположения здесь бóльшей части мрамора. Увеличивается при этом и поток газов, способствующий отрыву капли от торца электрода.

Влияние положения CaF_2 в слоях покрытия сказывается на характере переноса в значительно большей мере, чем количество и расположение в них газообразующего компонента (мрамора). Из рис. 197 видно также, что электроды, не содержащие мрамора в покрытии, но имеющие двухслойную конструкцию с CaF_2 в наружном слое, на одних и тех же режимах сварки имеют при переходе капель меньшую длительность коротких замыканий, чем электроды, содержащие в покрытии 30 % мрамора, но с CaF_2 во внутреннем слое.

Положительное влияние на перенос металла роста количества газов, выделяющихся из покрытия, по мере увеличения в нем мрамора проявляется у всех исследованных электродов.

Влияние соотношения мрамор — плавиковый шпат во внутреннем и наружном слоях покрытия [36, 155, 164]. Для экспериментов применяли электроды диаметром 4 мм серии Д1—Д5 (табл. 64), в которых изменяли содержание CaF_2 в наружном слое от 0 (электроды Д1) до 100 % (электроды Д5) от его общего количества введением во внутренний слой эквивалентного количества $CaCO_3$. В пересчете на обычное (однослойное) покры-

Таблица 64. **Состав покрытия электродов с различным содержанием мрамора и плавикового шпата в слоях, % (по массе)**

Составляющая покрытия	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
Мрамор	4,0/49	19/34	26,5	34/19	49/4
Плавиковый шпат	45,0/—	30/15	22,5	15/30	—/45

Примечания. 1. В составе каждого слоя покрытия по 8 % ферросилиция, 4 % ферромарганца, 25 % железного порошка, 7 % ферротитана и синтетической слюды и 1 % КМЦ (сверх 100 %). 2. Электроды Д3 имели обычное (однослойное) покрытие. 3. Коэффициент массы покрытия электродов $K_{м.п} \approx 50$ %. 4. Соотношение площадей внутреннего и наружного слоев $S_{вн}/S_{нар} = 1/1$. 5. Связующее — натриево-калиевое жидкое стекло. 6. Перед чертой — данные для внутреннего слоя покрытия, за чертой — для наружного его слоя

Таблица 65. **Длительность коротких замыканий и продолжительность пауз между ними, мс, в зависимости от содержания CaF_2 в наружном слое покрытия и величины сварочного тока**

Электрод	% CaF_2	120 А		150 А		180 А	
		$\tau_{к.з}$	$T_{к.з}$	$\tau_{к.з}$	$T_{к.з}$	$\tau_{к.з}$	$T_{к.з}$
Д1	0	18,1/13,1	248/223	13,8/9,7	255/235	10,5/7,7	280/263
Д2	33,3	13,9/11,9	219/207	10,5/8,4	197/202	8,7/7,5	197/198
Д3	50	13,2/10,9	209/185	9,4/7,6	184/171	8,3/6,8	180/174
Д4	66,7	11,0/10,1	156/132	9,1/7,3	150/169	6,9/5,7	153/117
Д5	100	8,9/7,4	141/124	7,1/6,3	128/118	5.7/4,8	102/98

Примечания. 1. Приведены средние значения из пяти экспериментов. 2. Сварка в нижнем положении. 3. Перед чертой — данные для сварки при обратной полярности, за чертой — для сварки при прямой полярности. ток постоянный.

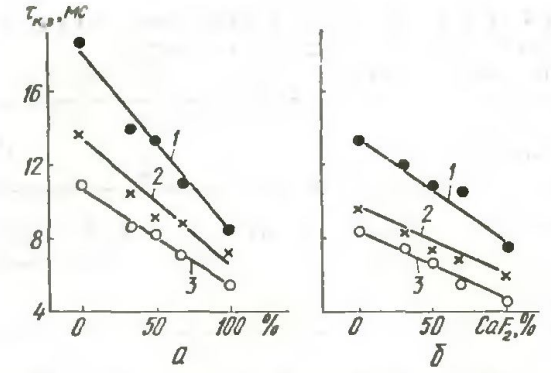


Рис. 197. Зависимость длительности коротких замыканий от содержания CaF_2 в наружном слое покрытия при сварке постоянным током обратной (*а*) и прямой (*б*) полярностей:
2 — $I_{св}$ = 120 А; *2* — 150 А; *3* — 180 А.

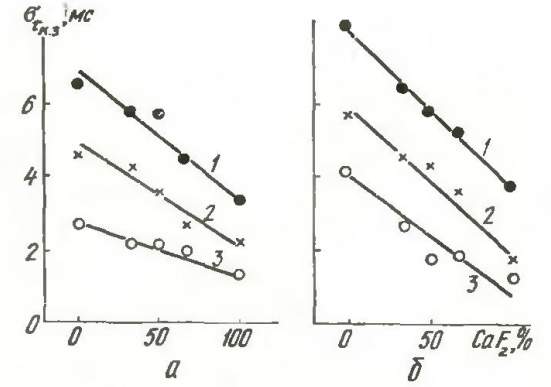


Рис. 198. Зависимость среднеквадратического отклонения длительности коротких замыканий от содержания CaF_2 в наружном слое покрытия при сварке постоянным током обратной (*а*) и прямой (*б*) полярностей:
1 — $I_{св}$ = 120 А; *2* — 150 А; *3* — 180 А.

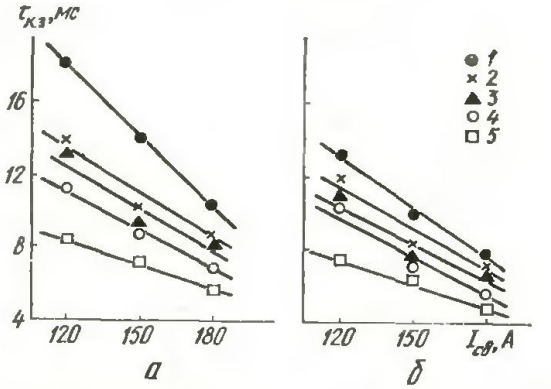


Рис. 199. Зависимость длительности коротких замыканий от тока при сварке постоянным током обратной (*а*) и прямой (*б*) полярностей электродами с содержанием CaF_2 в наружном слое покрытия:
1 — 0 %; *2* — 33,3 %; *3* — 50 %; *4* — 66,7 %; *5* — 100 %.

тие состав электродов не изменялся. Результаты экспериментов приведены в табл. 65 и на рис. 197—200.

При сварке на обратной полярности (см. рис. 197, *а*) с увеличением содержания фторида кальция в наружном слое длительность коротких замыканий снижается, что свидетельствует об уменьшении размеров переходящих в сварочную ванну электродных капель. Особенно эффективно это проявляется при сварке в потолочном положении (рис. 200), где, как известно, неблагоприятные последствия крупнокапельного переноса наиболее заметны. Заштрихованная зона соответствует критическим значениям $\tau_{к.з}$, при которых наиболее вероятно «примерзание» электрода к изделию вследствие перетекания в сварочную ванну слишком крупных капель. С ростом концентрации фторида в периферийном слое покрытия при сварке в потолочном положении вероятность обрывов дуги из-за «примерзаний» электрода снижается. Это ведет к повышению устойчивости горения дуги и облегчает манипулирование электродом при монтажной сварке.

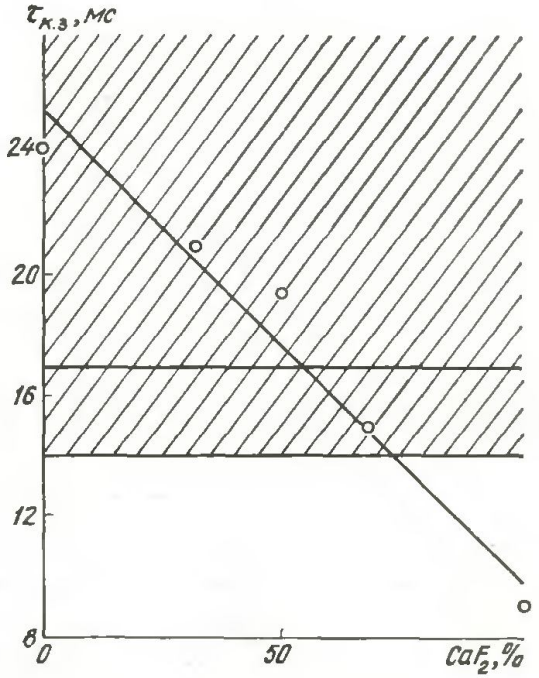


Рис. 200. Зависимость длительности коротких замыканий от содержания CaF_2 в наружном слое покрытия при сварке в потолочном положении постоянным током обратной полярности, $I_{св}$ = = 120 А (заштрихована область «примерзания» электрода).

Таблица 66. **Состав покрытия электродов серий С1 — С5 с различными соотношениями площадей слоев, % (по массе)**

Составляющая покрытия	С1 ($S_п = 0{,}5$)	С2 ($S_п = 0{,}75$)	С3 ($S_п = 1$)	С4 ($S_п = 1{,}33$)	С5 ($S_п = 2$)
Мрамор	73,5/3	57,2/3,5	49/4	42,9/4,7	36,8/6,0
Плавиковый шпат	—/33,8	—/39,4	—/45	—/52,5	—/67,5
Железный порошок	0,5/37,2	16,8/31,1	25/25	31,1/16,8	37,2/0,5

Примечания. 1. В составе каждого слоя покрытия по 8 % ферросилиция, 4 % ферромарганца, 7 % ферротитана и синтетической слюды АНС-1 и 1 % КМЦ (сверх 100 %). 2. Коэффициент массы покрытия электродов $K_{м.п} = 50$ %. 3. Связующее — натриево-калиевое жидкое стекло. 4. Перед чертой — данные для внутреннего слоя покрытия, за чертой — для наружного его слоя.

На повышение устойчивости сварочного процесса, наблюдаемого по мере вынесения CaF_2 в периферийный слой покрытия, указывает также снижение значения среднеквадратического отклонения длительности коротких замыканий (см. рис. 198, *а*).

На рис. 199, *а* приведена зависимость длительности коротких замыканий от величины сварочного тока и содержания CaF_2 в наружном слое покрытия. Видно, что по мере увеличения $I_{св}$ величина $\tau_{к.з}$ снижается у всех исследованных электродов. Однако интенсивность снижения длительности коротких замыканий при увеличении $I_{св}$ зависит от относительного содержания CaF_2 в наружном слое покрытия. Так, электроды, содержащие все количество CaF_2 во внутреннем слое покрытия (индекс Д1, см. табл. 67), наиболее чувствительны к изменениям сварочного тока. При сварке этими электродами даже небольшое уменьшение $I_{св}$ влечет за собой существенное повышение величины $\tau_{к.з}$. Наоборот, электроды, содержащие в наружном слое 100 % CaF_2 (индекс Д5), обеспечивают при сварке минимальную зависимость $\tau_{к.з}$ от сварочного тока. Последнее может в значительной мере способствовать получению бездефектных швов при монтажной сварке вследствие уменьшения вероятности «примерзания» электрода к изделию.

На прямой полярности описанная выше тенденция зависимостей величин $\tau_{к.з}$ и $\sigma_{\tau_{к.з}}$ от соотношения $CaCO_3/CaF_2$ в слоях электродного покрытия и тока сохраняется (см. рис. 197, 198, *б* и 199, *б*). Вынесение CaF_2 в наружный слой двухслойного покрытия сопровождается увеличением содержания $CaCO_3$ во внутреннем слое. При этом, согласно А. А. Ерохину [49], значительная часть CaF_2 может стекать в сварочную ванну, минуя электродную каплю на торце электрода. Облегчаются условия контакта металла капель с газами, выделяющимся непосредственно у электродного стержня, повышается окисленность электродных капель. Это снижает поверхностное и межфазное натяжение на границе металл — шлак, в результате чего диаметр переходящих капель уменьшается [50, 104, 148]. Измельчению капель способствует и расположение основной части мрамора в прилегающем к стержню слое, интенсивное разложение которого создает мощный газовый поток, способствующий дроблению капель на торце электрода и облегчающий отрыв от него более мелких капель. Образующаяся в этом случае относительно глубокая втулочка придает газовому потоку бо́льшую направленность.

Значительное влияние на изменение характера переноса электродного металла по мере вынесения фторида кальция в наружный слой покрытия может оказывать явление снижения контрагирования столба дуги и активных пятен, обнаруженное при сварке неплавящимся электродом [185, 191] и подтвержденное при сварке порошковой проволокой [88]. Так, по данным [88], по мере снижения содержания CaF_2 (с определенных концентраций) в шихте порошковой проволоки наблюдается увеличение среднего диаметра столба дуги (и, вероятно, ак-

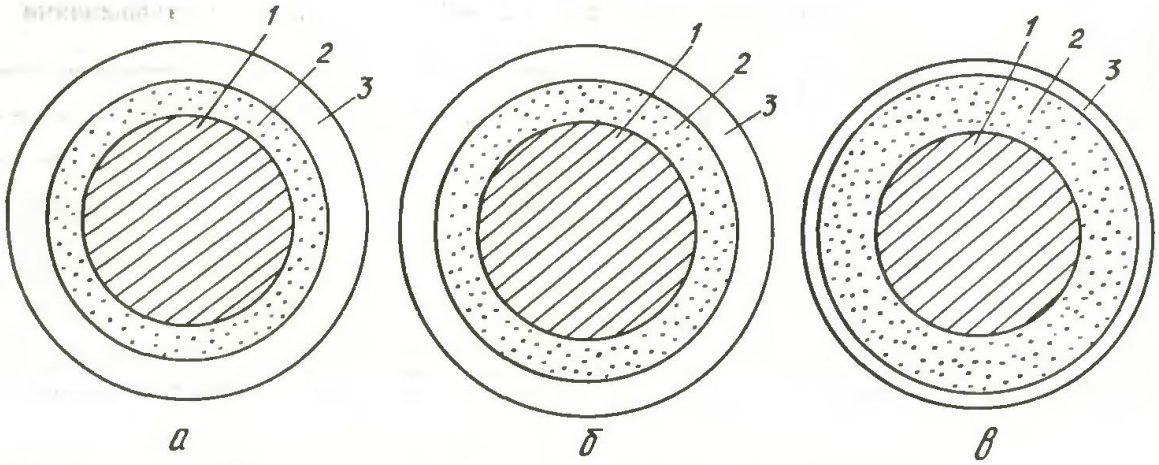


Рис. 201. Электроды с соотношением площадей слоев покрытия $S_{вн}/S_{нар}$:
а — 0,5; *б* — 1; *в* — 2; *1* — электродный стержень; *2* — внутренний слой, содержащий в основном мрамор; *3* — наружный слой.

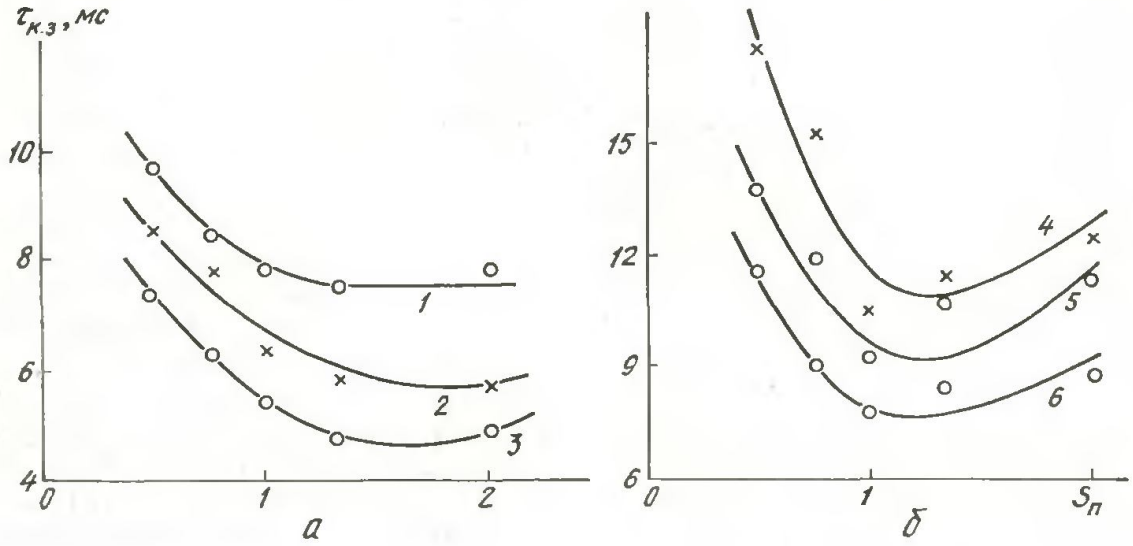


Рис. 202. Зависимость длительности коротких замыканий от соотношения площадей слоев покрытия при сварке в нижнем (*а*) и потолочном (*б*) положениях:
1,*5* — $I_{св}$ = 120 А; *2* — 150 А; *3* — 180 А; *4* — 100; *6* — 140 А.

тивных пятен) и уменьшение в нем плотности тока.

Последнее должно приводить к снижению сил, препятствующих переносу металла (осевая составляющая электромагнитной силы, реактивное давление паров), и способствовать измельчению переходящих электродных капель.

Аналогичный эффект должен иметь место и при сварке покрытыми электродами. Можно предположить, что в двухслойном покрытии вынесение CaF_2 в наружный слой (снижение его содержания у прилегающего к стержню слоя покрытия) сопровождается уменьшением парциального давления паров CaF_2 и других фтористых соединений в атмосфере дуги и вследствие этого расширением столба дуги и активного пятна на электроде. Это, в свою очередь, способствует снижению размеров капель.

Снижение контрагирования столба дуги и активных пятен в рассматриваемом случае может приводить также к уменьшению поверхностного натяжения электродного металла.

Влияние соотношения площадей слоев покрытия [155, 36]. Исследования проводили на электродах серии С1—С5 с диаметром стержня 4 мм. Состав покры-

тия электродов приведен в табл. 66. Соотношение площадей слоев покрытия $S_{вн}/S_{нар}$ изменяли от 0,5 до 2 (рис. 201). Базовым в экспериментах был электрод Д5 (см. табл. 68), у которого $S_п = 1$. Состав слоев выбирался так, чтобы суммарный (общий) состав покрытия электродов не изменялся.

Результаты исследований характера переноса металла приведены на рис. 202. Анализ полученных данных показывает, что при варке как в нижнем, так и потолочном положении увеличение соотношения $S_{вн}/S_{нар}$ сопровождается снижением длительности коротких замыканий при переходе капель.

По нашему мнению, полученные данные можно объяснить следующим образом. С ростом соотношения $S_{вн}/S_{нар}$ в диапазоне 0,5—1,33 вследствие отдаления от оси электрода наружного слоя покрытия, содержащего CaF_2 (см. рис. 201), снижается степень контрагирования дугового столба и активных пятен. Это приводит, как уже отмечалось, к уменьшению осевой составляющей электромагнитной силы и силы поверхностного натяжения. Кроме того, при увеличении соотношения $S_п$ растет объем внутреннего слоя покрытия, содержащего мрамор и служащего источником CO_2, что улучшает условия контакта с ним металла капель и приводит к повышению их окисленности. Эти факторы способствуют снижению длительности коротких замыканий при переходе электродных капель. В то же время с ростом $S_п$ уменьшается влияние аэродинамической силы на перенос металла вследствие снижения сосредоточенности газового потока при разложении мрамора в прилегающем к стержню слое. На важную роль этих сил в переносе металла указывается, в частности, в работе [322]. Влияние газовых потоков на перенос металла наиболее существенно сказывается при сварке в потолочном положении, когда действие силы тяжести препятствует переносу электродных капель.

Влияние коэффициента массы двухслойного покрытия. Значения $K_{м.п}$ электродов изменяли в пределах 35—73 % варьированием толщины покрытия. Кроме электродов Д1 и Д5 с двухслойной

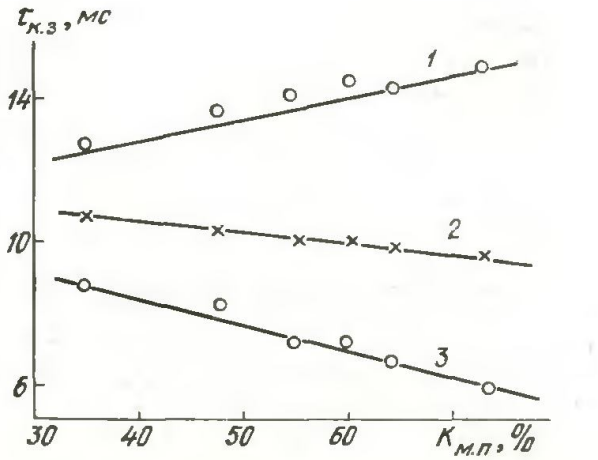


Рис. 203. Зависимость длительности коротких замыканий от коэффициента массы покрытия при содержании CaF_2 в наружном слое ($I_{св}$ = = 150 А):
1 — 0 %; *2* — 50 %; *3* — 100 %.

конструкцией покрытия, в экспериментах применяли электроды с обычным (однослойным) покрытием (индекс Д3, см. табл. 67).

Анализ полученных результатов (рис. 203) показывает, что по мере увеличения толщины (коэффициента массы) покрытия электродов, содержащих CaF_2 в наружном слое (индекс Д5), длительность коротких замыканий при переходе капель существенно снижается. Это можно объяснить тем, что с ростом $K_{м.п}$ фторид все больше отдаляется от центральной части дуги, вследствие чего можно ожидать снижения сжатия столба дуги и активных пятен и, в свою очередь, уменьшения сил, препятствующих отрыву капель (осевой составляющей электромагнитной силы, силы поверхностного натяжения и реактивной силы давления паров). Кроме того, снижению поверхностного натяжения металла капель по мере роста $K_{м.п}$, возможно, способствует утолщение внутреннего слоя покрытия, содержащего мрамор. Вследствие этого возможно повышение парциального давления CO_2 в прилегающей к стержню части атмосферы дуги и увеличение окисленности капель. По мере роста $K_{м.п}$ повышается благоприятная роль втулочки из нерасплавленного покрытия, глубина которой при этом увеличивается [35, 158, 162, 293].

При содержании CaF_2 во внутреннем слое (электроды с индексом Д1) увеличе-

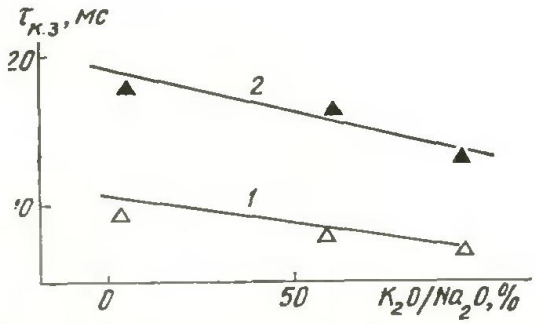


Рис. 204. Зависимость длительности коротких замыканий от соотношения K_2O/Na_2O в жидком стекле внутреннего слоя покрытия:
1 — $I_{св}$ = 120 А; 2 — $I_{св}$ = 180 А [165]

ние $K_{м.п}$ приводит к возрастанию длительности коротких замыканий, вызванных переходом капель в сварочную ванну. Это результат воздействия факторов, обратных рассмотренным выше для электродов Д5.

Влияние типа и расположения связующего в слоях покрытия [165]. В экспериментах применяли опытные электроды диаметром 4 мм с двухслойным покрытием (соотношение площадей сечений внутреннего и наружного слоев $S_{вн}/S_{нар}$ = = 1). Содержание всех основных компонентов в составе обоих слоев покрытия электродов было одинаковым, а отличались они типом жидкого стекла, используемого в качестве связующего. Применяли натриевые и калиевые жидкие стекла одного модуля, а также их смеси с определенным соотношением составляющих. Массовая доля жидкого стекла в каждом слое покрытия составляла 25 %. Содержание калиевого жидкого стекла (в указанных смесях) во внутреннем слое покрытия изменяли от 0 до 100 % (при соответствующем увеличении доли натриевого стекла в наружном слое) таким образом, чтобы общее содержание K_2O и Na_2O в покрытии оставалось неизменным. Результаты экспериментов приведены на рис. 204 и в табл. 67. Как видно, с увеличением соотношения K_2O/Na_2O во внутреннем слое покрытия длительность коротких замыканий и ее среднеквадратическое отношение уменьшаются.

Улучшение характера переноса металла (снижение $\tau_{к.з}$ и $\sigma_{\tau_{к.з}}$) по мере повышения соотношения K_2O/Na_2O в составе связующего внутреннего слоя покрытия связано с влиянием легкоионизируемых элементов и их соединений на параметры столба дуги и активных пятен, рассмотренным выше. При этом увеличение доли калиевого жидкого стекла (за счет натриевого) во внутреннем слое покрытия повышает вероятность попадания все больших количеств калия и его соединений в активную зону межэлектродного промежутка.

В результате проведенных исследований плавления и переноса металла можно сделать следующие выводы.

1. С повышением соотношения $CaF_2/CaCO_3$ в электродном покрытии, а также содержания CaF_2 в шлаке, образующемся при плавлении электрода, длительность коротких замыканий, вызванных переходом капель в сварочную ванну, возрастает, т. е. перенос металла становится более крупнокапельным. При этом возрастают также размеры капель, остающихся на торце электрода, и уменьшается глубина втулки из покрытия, что в конечном итоге увеличивает вероятность «примерзания» электрода к изделию, а следовательно, приводит к сужению диапазона рабочих токов и усложнению манипулирования электродом.

2. Увеличение величины сварочного тока способствует снижению длительности коротких замыканий.

3. Характеристики переноса металла можно улучшить увеличением толщины (коэффициента массы) покрытия до определенных пределов.

4. Длительность коротких замыканий можно уменьшить последовательной за-

Таблица 67. **Показатели переноса электродного металла, мс, в зависимости от соотношения K_2O/Na_2O в жидком стекле внутреннего слоя покрытия [165] ***

K_2O/Na_2O	120 А		180 А	
	$\tau_{к.з}$	$\sigma_{\tau_{к.з}}$	$\tau_{к.з}$	$\sigma_{\tau_{к.з}}$
2,9	18,3	6,1	9,3	5,3
60,8	16,5	5,7	8,5	4,5
96	13,5	5	7,6	3,8

* Ток постоянный, обратная полярность.

меной в покрытии литиевого жидкого стекла натриевым, калиевым и цезиевым, а также повышением соотношения K_2O/Na_2O в составе комбинированного жидкого стекла.

5. Эффективным методом улучшения характера переноса металла является применение двухслойного покрытия, в котором CaF_2 вынесен в наружный слой.

6. Применение электродов, отличающихся мелкокапельным переносом металла, обеспечивает устойчивый процесс сварки в более широком диапазоне режимов, чем при электродах с крупнокапельным переносом. Последнее чрезвычайно важно при сварке в монтажных условиях, когда наряду с обычными используются небольшие по величине сварочные токи.

Глава пятая

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДОВ

Технологические свойства электродов не могут рассматриваться без характеристик источников питания, потому что каждое из них зависит как от характеристик электродов (состава и конструкции покрытия, типа связующего, диаметра покрытия и т. п.), так и от характеристик источников питания (напряжения холостого хода, индуктивности, наклона внешней вольт-амперной характеристики и т. п.). Неправильно выбранные характеристики источников питания могут ухудшить технологические свойства электродов и, напротив, источники питания, в которых имеется возможность установления оптимальных характеристик в зависимости от конкретных условий сварки (марки и диаметра электрода, режима сварки и т. п.), позволяют существенно улучшить стабильность дуги, уменьшить разбрызгивание электродного металла, повысить производительность сварки. Этому способствует также применение различных приставок к источникам питания, предназначенных для улучшения определенных технологических свойств электродов: начального зажигания, стабильности дуги и др.

1. Применение «горячего» старта для улучшения начального зажигания электродов

Горячим стартом называется прием повышения плотности тока при начальном зажигании электрода [148, 230, 37]. Это способствует улучшению начального зажигания, полностью исключает вероятность «примерзания» электрода (при правильном выборе режима горячего старта) и уменьшает «стартовую» пористость [31].

Известны два способа повышения плотности тока при начальном зажигании электрода: уменьшение сечения начального участка стержня электрода его заточкой или высверливанием в нем отверстия [148] и повышение значения тока сварки на 20—50 % от его номинального значения [230, 5, 37]. Первый способ не получил широкого распространения из-за большой трудоемкости. Второй способ легко реализуется на практике благодаря появлению тиристорных источников питания, позволяющих регулировать ток сварки в широком диапазоне с помощью довольно простых по устройству приставок [230, 5].

Одна из таких приставок — УГС-1 [5] разработана в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР. Устройство предназначено для работы с тиристорными сварочными выпрямителями типа ВДУ (ВДУ-300, ВДУ-504 и др.). Оно позволяет повышать ток сварки при начальном зажигании электрода на 20—50 % от номинального значения в течение 1—10 с. Устройство УГС-1 использовано для исследования горячего старта при сварке покрытыми электродами, результаты которого приведены ниже.

Применялись электроды трех марок: АНО-4, УОНИ-13/55 и ДСК-50, которые характеризуются соответственно мелко-, средне- и крупнокапельным переносом металла. В качестве источника питания применялся сварочный выпрямитель ВДУ-504.

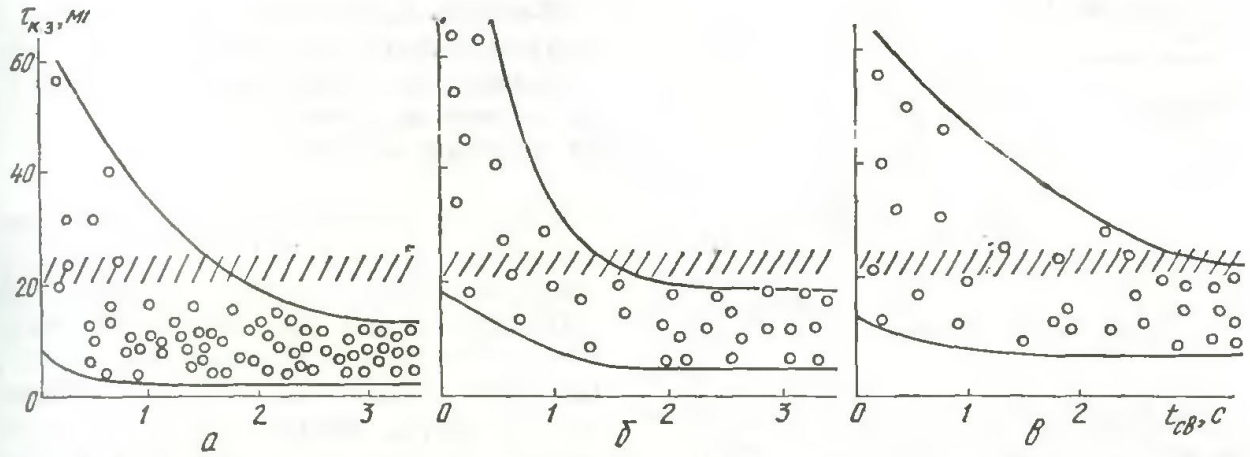


Рис. 205. Статистические данные об изменении длительности $\tau_{к.з}$ в начальный период при сварке постоянным током обратной полярности электродами ($d_э = 4$ мм):
а — АНО-4, $I_{св} = 160$ А; *б* — УОНИ-13/55, $I_{св} = 160$ А; *в* — ДСК-50, I св $= 180$ А (заштрихована граница «примерзания» электрода).

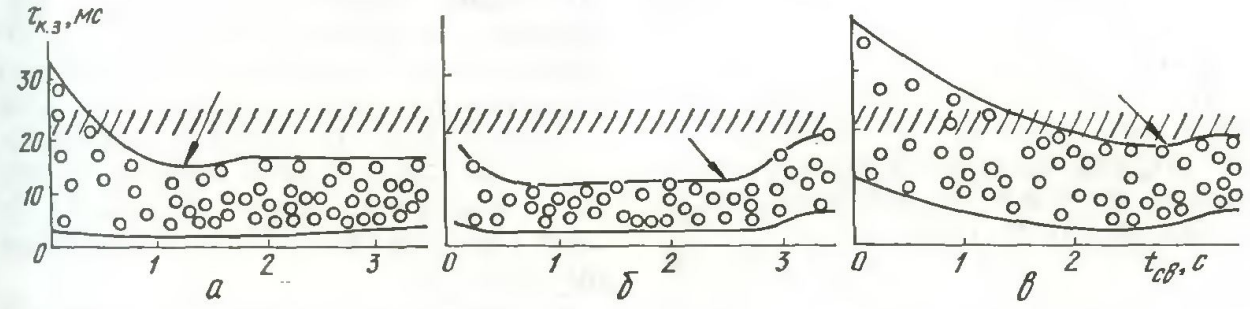


Рис. 206. Статистические данные об изменении длительности $\tau_{к.з}$ при горячем старте:
а — в — то же, что и на рис. 205; стрелкой показан момент отключения «горячего» старта; режим «горячего» старта приведен в табл. 68.

В начале исследований установлено, что при использовании горячего старта практически полностью отсутствует стартовая пористость. Для выявления причин такого влияния горячего старта проводились эксперименты, которые заключались в следующем. Сварщик многократно проводил начальное зажигание электрода с горячим стартом и без него. При этом напряжение дуги регистрировалось на шлейфовом осциллографе. По полученным осциллограммам напряжения дуги определяли изменение длительности коротких замыканий от момента начального зажигания до момента, когда перенос металла стабилизировался.

Полученные результаты (рис. 205) показывают, что длительность $\tau_{к.з}$ в первые 0,5—1 с сварки может превышать граничные значения, при которых наблюдаются примерзания электрода. Стабилизация переноса металла (уменьшение $\tau_{к.з}$ до значений, характерных для данной марки электродов и режима сварки) происходит через 1—3 с, причем это время для электродов с более мелкокапельным переносом металла (АНО-4, УОНИ-13/55) существенно меньше, примерно 1,5 с, чем для электродов с крупнокапельным переносом металла (ДСК-50) — 3,5—4 с. Следует заметить, что в течение этого времени сварщик вынужден держать дугу удлиненной, избегая примерзания электрода и тем самым ухудшая газовую защиту зоны сварки.

При использовании горячего старта стабилизация переноса металла происходит за более короткое время (рис. 206), причем при правильном выборе режима горячего старта полностью исключается опасность примерзания электрода. Следовательно, сварщик может не удлинять дугу при начальном зажигании, что обеспечивает требуемую газовую защиту зоны сварки. Это главный фактор, объяс-

Таблица 68. **Параметры режима горячего старта**

Электрод	$I_{св}$, А	$I_{г.с}$, А	$\tau_{г.с}$, с
АНО-4	160	210	1—2
УОНИ-13/55	160	230	2
ДСК-50	180	230	3

Примечание. Ток обратной полярности, положение сварного шва — нижнее.

няющий отсутствие стартовой пористости при использовании горячего старта.

Горячий старт уменьшает также время установления оптимальной газовой защиты расплавленного металла, которое измеряется от момента касания торцом электрода изделия и зажигания дуги до образования втулки из покрытия [52]. По нашим данным это время составляет 1—1,5 с. При горячем старте оно сокращается до 0,3—0,4 с. Это также способствует улучшению газовой защиты электродного металла и соответственно уменьшению стартовой пористости.

К числу других положительных аспектов применения горячего старта следует отнести более глубокое проплавление начального участка шва и получение более равномерного шва по высоте (без местного наплыва).

Необходимо отметить, что режим горячего старта должен подбираться индивидуально для каждой марки и диаметра электрода в зависимости от характера переноса металла, значения тока сварки, пространственного положения сварного шва и т. п. Для выбранных марок электродов ($d_э = 4$ мм) и режима сварки параметры горячего старта должны быть такими, как указано в табл. 68.

Превышение указанных в табл. 68 параметров режима горячего старта приводит к увеличению разбрызгивания электродного металла и к «выдуванию» сварочной ванны.

Наиболее эффективно использование горячего старта для электродов с крупнокапельным переносом металла, а также в тех случаях, когда имеются повышенные требования к качеству металла (в частности, отсутствие пор) и форме сварочного шва.

2. Влияние импульсов тока, индуктивности и формы внешней характеристики источника питания на перенос металла

Различные факторы, влияющие на перенос металла, такие, как состав покрытия электродов, длина дуги, ток сварки, ток короткого замыкания и другие, могут быть разделены в зависимости от того, на какие показатели переноса металла влияют они в первую очередь. Так, от состава покрытия, длины дуги и тока сварки, как показано выше, зависят практически все показатели переноса металла: $m_к$, $d_к$, $\tau_{к.з}$, $f_{к.з}$ и др., в то время как ток КЗ влияет в основном на один, но весьма важный показатель — длительность коротких замыканий. Эта избирательность тока КЗ дает возможность управления переходом капли электродного металла без оказания отрицательного воздействия на весь процесс сварки, естественно, если при регулировании тока КЗ не изменяются другие параметры процесса.

Регулировать амплитудное значение токе КЗ и скорость его изменения можно с помощью импульсов тока; путем изменения наклона внешней вольт-амперной характеристики (ВАХ) или переходом в момент КЗ на другую ВАХ; через индуктивность сварочного контура.

Таблица 69. **Характер переноса металла в зависимости от индуктивности сварочного контура при сварке покрытыми электродами**

Наименование параметра	Индуктивность, мГн	
	0,15	0,45
Среднее значение $I_{к.з}$, А	235	230
Общее число случайных и действительных КЗ за 40 с сварки	538	514
Среднее значение длительности всех КЗ, мс	3,4	3,6
Число действительных КЗ за 40 с сварки	190	185
Среднее значение длительности действительных КЗ $\tau^{ср}_{к.з}$, мс	8,9	9,3

Примечание. Источник питания ВС-300, электроды марки УОНИ-13/55, $d_э = 4$ мм, $I_{св} = 160$ А, обратная полярность.

Таблица 70. **Средняя длительность коротких замыканий в зависимости от вольт-амперной характеристики при сварке покрытыми электродами**

Электрод	$U_{х.х}$ = =85 В, $I_{к.з}$ = =210 А	$U_{х.х}$ = =60 В, $I_{к.з}$ = =250 А	$U_{х.х}$ = =40 В, $I_{к.з}$ = =300 А
УОНИ-13/55	8,9	8,4	7,8
АНО-11	15,9	13,2	10,0

Примечание. $I_{св} = 110$ А, $d_э = 4$ мм, обратная полярность.

Исследование влияния импульсов тока на характер перетекания капли электродного металла во время КЗ показало, что применение этого способа при сварке покрытыми электродами имеет ряд существенных трудностей. Например, достаточно сложно правильно выбрать длительность и момент окончания импульса тока. Оптимальным вариантом является тот, когда импульс тока заканчивается за 0,5—1 мс до окончания КЗ, чтобы не вызывать взрыва перемычки. Но из-за того, что длительность КЗ изменяется в широком диапазоне даже в течение одного эксперимента, предсказать момент его окончания в каждом случае не представляется возможным. В результате этого в одном случае окончание импульса тока имеет место после КЗ и происходит взрыв перемычки с выбросом электродного металла за пределы зоны дуги, а в другом длительность импульса настолько мала по сравнению с длительностью КЗ, что его прохождение не оказывает заметного влияния на переход капли электродного металла.

Низкая эффективность импульсов тока при сварке покрытыми электродами обусловлена еще и тем, что малая плотность тока, характерная для этого способа сварки, приводит к зарождению относительно крупных капель электродного металла, имеющих большую инерционность. Такие капли трудно сбросить с торца электрода импульсом тока, а также ускорить их перетекание во время КЗ. К тому же большая площадь сечения перемычки снижает плотность тока в момент прохождения импульса. Экспериментально установлено, что даже импульсы тока амплитудой до 500—600 А и длительностью 2—3 мс часто не приводят к окончанию КЗ при сварке электродами диаметром 4 мм. Еще большее увеличение амплитуды импульса тока вызывает повышение разбрызгивания электродного металла.

Регулирование индуктивности сварочного контура не приводит к существенному изменению характера переноса электродного металла при сварке покрытыми электродами (табл. 69), хотя, как известно [157], этот способ воздействия на перенос металла довольно эффективен при механизированной и автоматической дуговой сварке (см. рис. 206). Указанное различие обусловлено тем, что в первом случае используются источники питания с крутопадающей ВАХ, характеризующейся невысокими значениями $I_{к.з}$, а перенос металла сопровождается длительными КЗ (20—30 мс и более), в то время как во втором случае источники питания имеют жесткую или пологопадающую ВАХ с высокими значениями $I_{к.з}$. При этом перенос металла осуществляется либо без КЗ, либо посредством КЗ длительностью в основном до 10 мс.

Невысокое амплитудное значение тока $I_{к.з}$, обусловленное крутопадающей ВАХ и, следовательно, малое время нарастания тока в начале КЗ, которое составляет незначительную часть длительности КЗ, приводят к низкой чувствительности характера переноса металла от индуктивности сварочного контура при сварке покрытыми электродами.

Уменьшение наклона ВАХ хотя и приводит к сокращению длительности $\tau_{к.з}$ (табл. 70), но вместе с тем ухудшает стабильность дуги из-за понижения напряжения $U_{х.х}$ и увеличивает разбрызгивание электродного металла. Если же ограничить диапазон изменения напряжения $U_{х.х}$ (например, от 60 до 80 В), то значительно уменьшится и эффект, оказываемый при этом на длительность КЗ.

Наиболее оптимальным способом в данных условиях является регулирование тока КЗ путем перехода во время короткого замыкания на другую ВАХ. Этот способ исследовался с помощью опытного источника питания постоянного тока, в котором имелась возможность

Таблица 71. **Характер переноса электродного металла и измерители расплавления электрода в зависимости от тока короткого замыкания**

Источник питания	Электрод	$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$I_{к.з}$, А	Число КЗ за 40 с сварки, шт.		Среднее значение длительности действительных КЗ, мс	$\alpha_н$, г/(А·ч)	$\psi_{н.б}$, %
					случайных и действительных	действительных			
ВС-300	АНО-Т	3	80	140	2300	160	5,6	—	—
	УОНИ-13/55	4	160	230	530	190	9,1	10,1	1,2
	АНО-27	5	230	310	940	120	16,2	—	—
Опытный режим 1	АНО-Т	3	50 *	110	2830	120	9,7	—	—
		3	80	145	2010	190	5,4	—	—
	УОНИ-13/55	4	160	250	850	170	9,3	10,1	1,8
	АНО-27	5	180 *	260	950	80	21,7	—	—
		5	220	310	1090	110	16,5	—	—
		5	230	320	910	170	15,9	—	—
режим 2	АНО-Т	3	50 *	70	1370	110	12,3	—	—
		3	80	120	1800	130	6,8	—	—
	УОНИ-13/55	4	160	200	800	150	13,2	10,8	0,6
	АНО-27	5	230 *	290	800	100	18,1	—	—

Примечания. 1. Для всех указанных режимов сварки отмечено незначительное разбрызгивание металла. 2. Звездочкой отмечен минимально возможный ток сварки.

перехода в моменты КЗ как на более жесткую (режим 1), так и на более мягкую (режим 2) ВАХ. В первом случае сокращается длительность КЗ, уменьшается вероятность «примерзания» электрода и, как следствие, снижается минимально возможный ток сварки (табл. 71), во втором существенно снижается разбрызгивание металла и повышается производительность сварки, но при этом возрастает длительность КЗ (см. табл. 71). Поэтому переход на более мягкую характеристику должен проводиться только в том случае, если процесс сварки характеризуется мелкокапельным переносом металла. Благоприятное влияние понижения тока КЗ на скорость расплавления электрода обусловлено характером переноса металла. При уменьшении тока КЗ снижается пинч-эффект и облегчается образование перемычки жидкого металла в момент касания каплей металла поверхности ванны. После перехода капли металла приэлектродная область дуги перемещается ближе к границе сплавления между оставшейся частью капли и электродным стержнем, ускоряя его расплавление, в то время как в случае повышенного тока КЗ капля металла может быть отброшена электромагнитной силой, что увеличивает число случайных КЗ, не сопровождающихся переходом металла (см. табл. 71), и повышает время существования на торце электрода капли металла, которая препятствует более эффективной передаче тепла дуги стержню электрода.

Таким образом, современные источники питания должны иметь возможность изменения формы внешней ВАХ, чтобы в зависимости от условий сварки можно было оптимизировать процесс с целью уменьшения разбрызгивания металла, понижения минимально возможного тока сварки, повышения производительности и др.

3. Характеристики сварочных трансформаторов и стабильность дуги

Сварочные трансформаторы, используемые для ручной дуговой сварки, различаются между собой многими параметрами: номинальным током, способом и пределами регулирования тока, напряжением холостого хода, коэффициентом мощности и др. Представляет интерес определить, какие из этих параметров и в какой степени могут повлиять на харак-

Таблица 72. **Технические данные сварочных трансформаторов**

Тип трансформатора	Номинальный сварочный ток, А	ПВ, %	Пределы регулирования тока, А	Номинальное вторичное напряжение, В	$U_{х.х}$, В	Потребляемая мощность, кВт	КПД	Коэффициент мощности	Конструктивное исполнение
ТСД-500	500	60	200—600	45	80	48,5	0,87	0,55	Подвижный сердечник
ТД-500	500	60	85—700	30	76	32,0	0,87	0,53	Подвижные обмотки
СТШ-500/80	500	60	60—800	50	80	44,5	0,92	0,54	Подвижный шунт
СТШ-500	500	60	145—650	30	60	33,0	0,90	0,53	То же
СТШ-250	250	20	90—250	30	62	16,0	0,88	0,52	« »
ТСМ-250	250	20	92—250	30	60	16,0	9,69	0,55	Ярмовое рассеяние

тер повторного зажигания и в целом на стабильность дуги переменного тока.

С этой целью исследованы параметры повторного зажигания дуги при использовании различных сварочных трансформаторов, основные технические характеристики которых сведены в табл. 72. Трансформаторы выбраны таким образом, чтобы можно было бы сравнить между собой трансформаторы, имеющие одинаковый номинальный ток сварки, но разное напряжение холостого хода, либо одинаковое напряжение холостого хода,

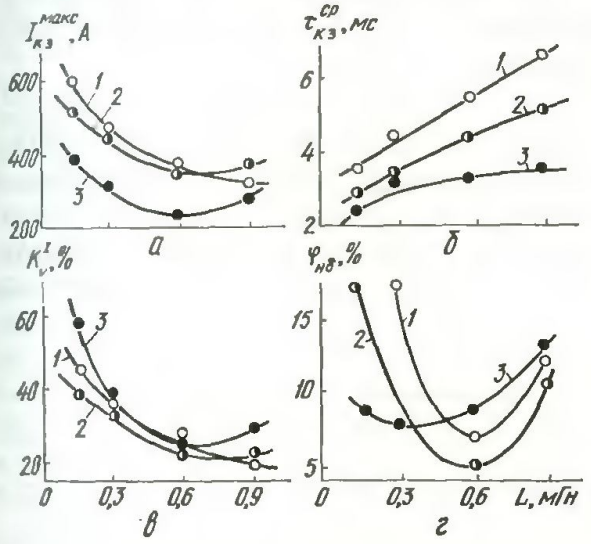


Рис. 207. Зависимость максимального тока (*а*) и средней длительности (*б*) коротких замыканий, коэффициента вариации тока сварки (*в*) и коэффициента набрызгивания металла (*г*) от индуктивности сварочного контура при автоматической сварке в среде CO_2 проволокой Св-08Г2С: *1* — $d_э$ = 1,6 мм; $U_д$ = 24 В, $I_{св}$ = 200 А; *2* — то же, $d_э$ = 1,2 мм; *3* — $d_э$ = 1 мм, $U_д$ = 22 В, $I_{св}$ = = 150 А.

но различный способ регулирования тока сварки и т. п. Сварка выполнялась электродами диаметром 4 мм марок АНО-11, УОНИ-13/45 и АНО-4.

Результаты измерения напряжения, тока и времени повторного зажигания дуги приведены на рис. 208 и 209. Из их анализа следует, что в полупериоды прямой и обратной полярностей значения указанных параметров применительно к трансформатору ТСД-500 отличаются от значений, полученных при использовании других трансформаторов.

Для установления причин ухудшения параметров повторного зажигания при использовании трансформатора ТСД-500 проведены дополнительные эксперименты с заменой его дросселя балластным реостатом и внешним дросселем.

Полученные результаты даны в табл. 73. Для сравнения там же приведены результаты, полученные при использовании трансформатора СТШ-500/80.

Анализ данных показывает, что в случае использования трансформатора ТСД-500 параметры повторного зажигания имеют наихудшие значения. Использование этого же трансформатора в сочетании с отдельным внешним дросселем или балластным реостатом (встроенный дроссель отключен) приводит к заметному понижению значения параметра $U_з^{ср}$, следовательно, худшие показатели повторного зажигания дуги связаны с конструкцией трансформатора ТСД-500 [177], которая характеризуется размещением дросселя на ярме трансформатора

(комбинированная схема). При такой конструкции возможно магнитное насыщение сердечника трансформатора при минимальных воздушных зазорах в дросселе, что оказывает отрицательное воздействие на переходные процессы в сварочной цепи, особенно в момент смены полярности [97].

Для выявления механизма этого воздействия исследовалась производная тока сварки $di_{св}/dt$ с использованием электронного устройства, прямо пропорционально преобразующего скорость изменения напряжения, снимаемого с измерительного шунта, в разность потенциалов.

На рис. 210 приведены данные, полученные для трансформаторов ТСД-500 и СТШ-500/80 (для остальных трансформаторов форма кривой $di_{св}/dt$ аналогична таковой для трансформатора СТШ-500/80).

Из анализа этих результатов видно, что для трансформатора СТШ-500/80 максимальные значения $di_{св}/dt$ наблюдаются сразу же после смены полярности (в момент повторного зажигания дуги), в то время как при использовании трансформатора ТСД-500 этот показатель достигает своих максимальных значений значительно позже. Это приводит к задержке развития дугового разряда, увеличению напряжения $U_з^{ср}$ и времени $t_з^{ср}$ при относительно невысоких значениях тока $I_з^{ср}$. Это согласуется с результатами исследований влияния индуктивности дросселя на параметры повторного зажигания дуги, полученными ранее Г. И. Лесковым [97]. Применительно к трансформатору

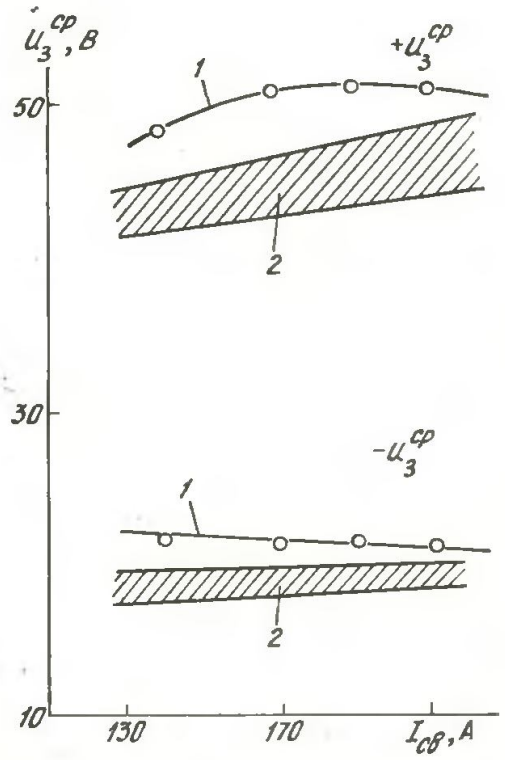


Рис. 208. Результаты измерения напряжения: *1* — трансформатор ТСД-500; *2* — остальные пять трансформаторов.

ТСД-500 степень магнитного насыщения сердечника можно изменять с помощью дросселя с воздушным зазором. Увеличение воздушного зазора приводит к уменьшению степени магнитного насыщения сердечника трансформатора, повышению значения $di_{св}/d_t$ при одновременном увеличении тока сварки.

Влияние этих двух параметров ($di_{св}/dt$ и $I_{св}$) на напряжение $U_з^{ср}$ противоположно (значение $U_з^{ср}$ повышается при увеличении $I_{св}$ и понижается при возрастании $di_{св}/dt$) и они могут компенсировать друг друга. Этим объясняется постоянство

Таблица 73. **Параметры повторного зажигания дуги в зависимости от конструктивных особенностей сварочного трансформатора**

Тип трансформатора	$+U_з^{ср}$, В	$-U_з^{ср}$, В	$+I_з^{ср}$, А	$-I_з^{ср}$, А	$+t_з^{ср}$, мс	$-t_з^{ср}$, мс
СТШ-500/80	41	17	15	14	0,34	0,22
ТСД-500	51	21	13	14	0,47	0,24
ТСД-500						
с заменой встроенного дросселя балластным реостатом	43	21	9	9	1,96	1,34
с заменой встроенного дросселя внешним дросселем	41	17	16	15	0,35	0,22
СТШ-500/80	41	17	15	14	0,34	0,22

Примечание. Электроды АНО-11, $d_э = 4$ мм, $I_{св} = 170$ А.

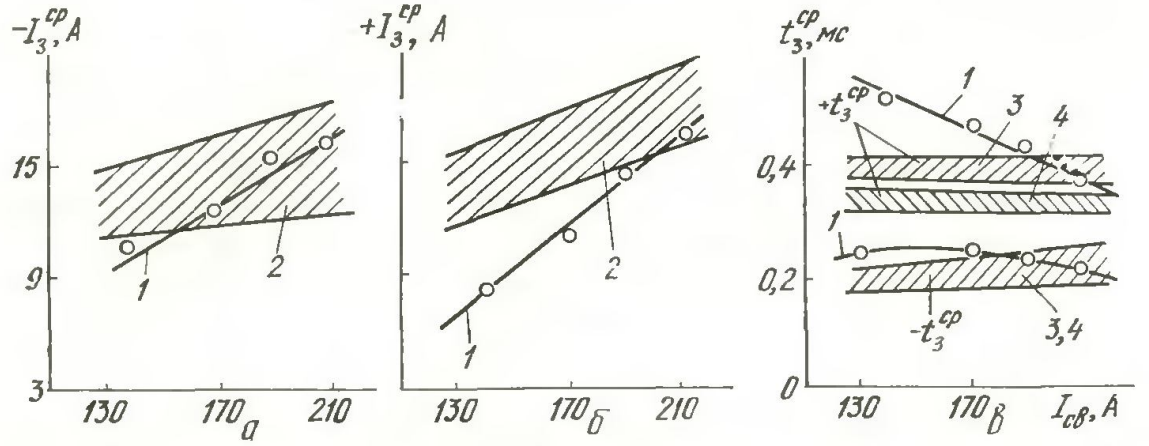


Рис. 209. Зависимость параметров $-I_з^{ср}$, $+I_з^{ср}$ и $t_з^{ср}$ от тока сварки (электроды АНО-11, $d_э$ = = 4 мм) при использовании сварочных трансформаторов:
1 — ТСД-500; *2* — остальные пять трансформаторов: *3* — СТШ-250, СТШ-500, ТСМ-250; *4* — СТШ-500/80, ТД-500.

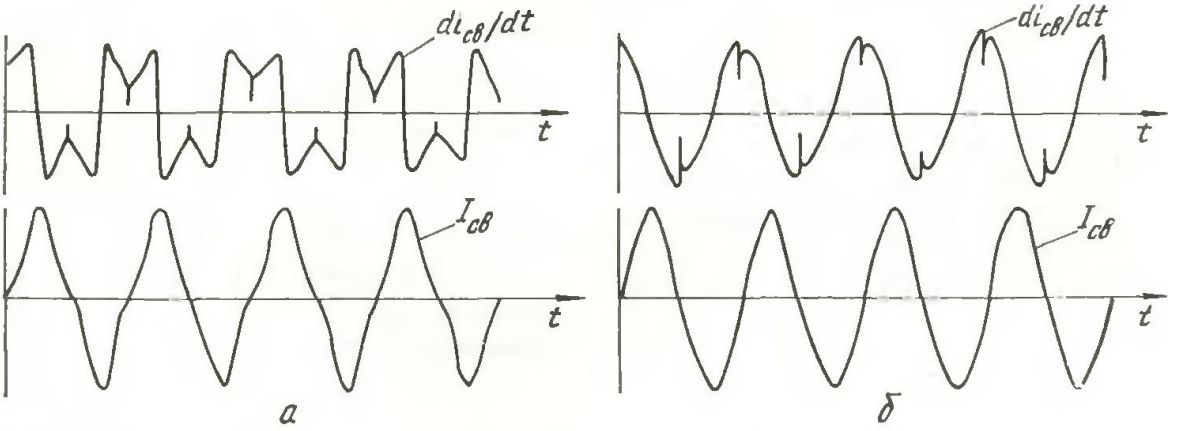


Рис. 210. Изменение параметров $I_{св}$ и $di_{св}/dt$ во времени для трансформаторов:
а — ТСД-500; *б* — СТШ-500/80

значения напряжения $U_з^{ср}$, полученное для трансформатора ТСД-500 при увеличении тока $I_{св}$ (см. рис. 208).

Рост напряжения повторного зажигания при увеличении тока $I_{св}$, характерный для остальных трансформаторов, говорит о незначительных изменениях параметра $di_{св}/d_t$ и, следовательно, отсутствии магнитного насыщения их сердечников. Вместе с тем уменьшение магнитного насыщения сердечника трансформатора ТСД-500 вызывает и сокращение времени $t_з^{ср}$ (см. рис. 209).

Из анализа представленных данных следует также, что трансформатор ТСД-500 наилучшими характеристиками будет обладать при токе сварки свыше 210—220 А.

Как видно из рис. 209, *в*, значение параметра $+t_з^{ср}$ тем меньше, чем выше $U_{х.х}$. Это связано с тем, что при высоком напряжении $U_{х.х}$ и большом угле сдвига фаз между ним и током дуги напряжение дугового промежутка при повторном зажигании не достигает значения мгновенного напряжения холостого хода (рис. 211, *а*). Всплеск напряжения в этом случае имеет остроконечную форму, а время повторного зажигания характеризуется небольшими значениями. Если же напряжение $U_{х.х}$ мало, то напряжение дугового промежутка перед повторным зажиганием может приближаться к значениям напряжения $U_{х.х}$ и расти далее по синусоидальному закону вплоть до момента повторного зажигания (рис. 211, *б*). В этом случае после крутого фронта нарастания напряжения дугового промежутка следует участок медленного роста, что приводит к повышению времени повторного зажигания дуги.

Разница в значениях времени повторного зажигания на прямой полярности ($-t_з^{ср}$) для трансформаторов с различным напряжением $U_{х.х}$ незначительна, так как напряжение $-U_з$ мало и, как правило, не достигает мгновенных значений напряжения холостого хода в момент повторного зажигания, даже если $U_{х.х} = 60$ В.

Таким образом, на значения $U_з^{ср}$, $I_з^{ср}$ и $t_з^{ср}$ оказывает влияние характер изменения производной тока при смене полярности, причем время повторного зажигания дуги в полупериоды обратной полярности $+t_з^{ср}$ зависит и от напряжения холостого хода трансформатора.

Из того, что напряжение $+U_з^{ср}$ входит в зависимость (2.14), определяющую напряжение $U_{х.х}^{min}$ электрода, а стабильность дуги оценивается разностью $U_{х.х}^{min}$ и $U_{х.х}$ (см. вторую главу), следует, что при использовании трансформатора ТСД-500 стабильность дуги будет ниже, чем при использовании трансформатора СТШ-500/80, хотя они характеризуются одинаковым напряжением $U_{х.х}$.

При использовании других марок электродов (УОНИ-13/45, АНО-4) получены результаты, в качественном отношении аналогичные описанным выше для электродов марки АНО-11.

Постоянство напряжения $U_з^{ср}$, отмеченное при использовании трансформаторов СТШ-500, ТД-500, СТШ-500/80, ТСМ-250 и СТШ-250, говорит о том, что влияние свойств этих трансформаторов на повторное зажигание дуги примерно одинаково.

4. Улучшение повторного зажигания дуги переменного тока с помощью импульсных стабилизаторов

Низкая стабильность дуги не позволяет широко использовать сварку переменным током при изготовлении изделий ответственного назначения, так как при этом используются электроды с основным видом покрытия, имеющие высокие значения напряжения $+U_з^{ср}$. Улучшить стабильность дуги переменного тока можно, используя различные устройства стабилизации, как встроенные в трансформатор [64, 61, 62], так и автономные, подключаемые к трансформатору перед сваркой [58, 59].

В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработаны автономные импульсные стабилизаторы горения дуги (ИСГД): СД-2, СД-3, СД-100М [58, 59] и сварочные трансформаторы со встроенными ИСГД: И-120УЗ («Разряд-160», «Разряд-250»), ТДК-315 («Разряд-315») [64, 61, 62].

В указанных устройствах реализован следующий принцип стабилизации дуги. При смене полярности к дуговому промежутку прикладывается двухполярный импульс напряжения ((400± 50) В), позволяющий поддерживать плазму межэлектродного промежутка, проводить быструю смену полярности (т. е. уменьшать время негорения дуги), и тем самым облегчать повторное зажигание дуги. Стабилизирующие импульсы могут подаваться либо один раз за период (частота стабилизирующих импульсов 50 Гц), например при смене полярности с прямой на обратную (СД-2) [58], либо при каждой смене полярности (—100 Гц), как с прямой на обратную, так и наоборот (СД-3, СД-100М, «Разряд-160», «Разряд-250», «Разряд-315») [59]. Чем выше частота стабилизирующих импульсов и правильнее выбран момент их подачи, тем стабильнее дуга и ниже может быть напряжение $U_{х.х}$ трансформатора.

Ниже на примере трансформатора «Разряд-250» показано, каким образом достигается улучшение повторного зажигания дуги при использовании ИСГД. Основные технические характеристики трансформатора:

Номинальный ток сварки	250 А
Период включения	20 %
Пределы регулирования тока сварки	90—250 А
Номинальное вторичное напряжение	30 В
Напряжение холостого хода	60 В
Потребляемая мощность	16 кВт
Коэффициент полезного действия	0,69
Коэффициент мощности	0,55
Частота следования стабилизирующих импульсов	100 Гц

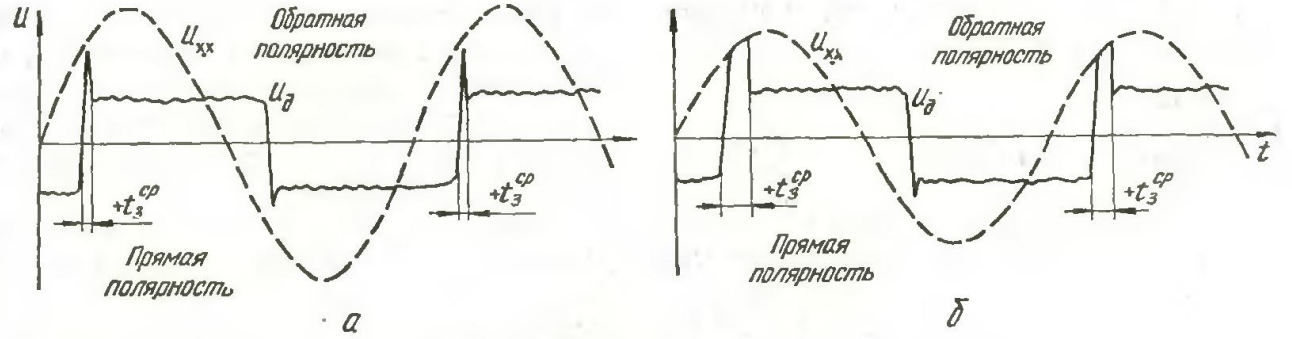


Рис. 211. Зависимость времени $+t_з^{ср}$ от напряжения $U_{х.х}$:
а — высокое напряжение $U_{х.х}$; *б* — низкое напряжение $U_{х.х}$.

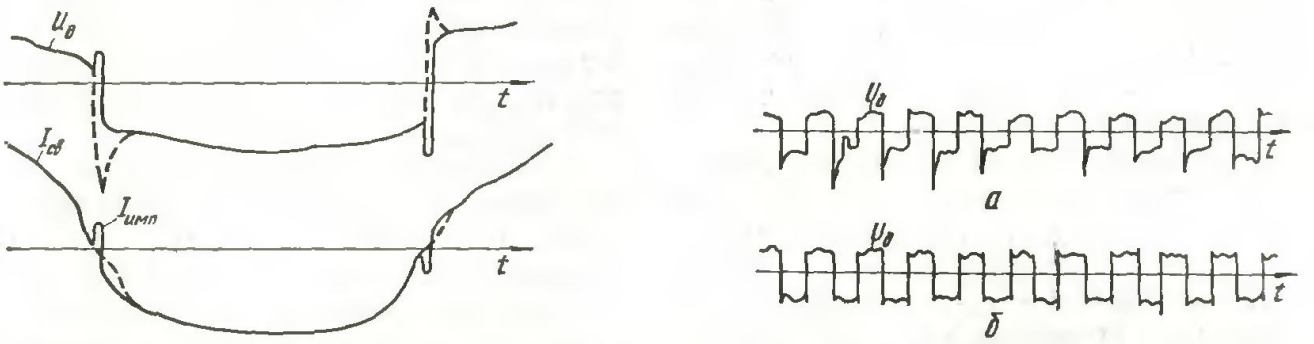


Рис. 212. Характер зависимостей $U_д = f(t)$ и $I_{св} = f(t)$ при использовании трансформатора «Разряд-250» и электрода с основным покрытием (штриховые линии — эти же зависимости для трансформатора СТШ-500/80).

«Рис. 213. Характерные осциллограммы напряжения дуги при использовании трансформаторов СТШ-500/80 (*а*) и «Разряд-250» (*б*) и электродов с основным покрытием.

Напряжение зарядки коммутирующих конденсаторов	200—500 В
Время отключения ИСГД после прекращения сварки	0,5—2 с

Трансформатор «Разряд-250» имеет встроенный ИСГД с частотой стабилизирующих импульсов 100 Гц с двойным управлением: по току и по напряжению [60]. Управление ИСГД по току позволяет подавать стабилизирующие импульсы напряжения в моменты, когда ток сварки уменьшается до нуля, т. е. именно при смене полярности. Управление ИСГД по напряжению необходимо в тех случаях, когда дуга по каким-либо причинам (переход крупной капли электродного металла, кратковременное удлинение дуги и т. п.) не зажглась в одном из полупериодов. В этом случае управление по току невозможно. Стабилизирующий импульс подается благодаря наличию управления по напряжению, причем импульс напряжения подается не в момент смены полярности, а спустя 1—4 мс, т. е. когда к дуговому промежутку приложено мгновенное напряжение трансформатора, достаточное для последующего поддержания горения дуги.

На рис. 212 показан фрагмент осциллограммы напряжения дуги и тока сварки при использовании трансформатора «Разряд-250». Видно, что стабилизирующий импульс напряжения двухполярной формы. В первый момент времени, перед тем как ток через дуговой промежуток достигнет нулевого значения, импульс напряжения и тока имеет направление, совпадающее с напряжением и током дугового промежутка в этом полупериоде и поддерживает горение дуги. Затем стабилизирующий импульс меняет направление на обратное за время, примерно равное 0,05 мс. Это способствует тому, что плазма дугового промежутка не успевает деионизироваться и дуга зажигается при напряжении, примерно равном напряжению дуги (рис. 213). При этом стабилизирующий импульс напряжения шунтируется протекающим током. Характерное изменение напряжения $+U_з^{ср}$

(В), наблюдаемое при этом, показано ниже ($I_{св}$ = 170 А, $d_э$ = 4 мм):

Электрод	СТШ-500/80	«Разряд-250»
АНО-11	42,1	26,4
УОНИ-13/45	53,4	33,2

Описанный выше принцип работы ИСГД позволяет обеспечивать стабильность дуги при использовании электродов с покрытием основного вида. При этом разрывная длина (эластичность) дуги для электродов марки УОНИ-13/45 при $I_{св}$ = 170 А составляет 8—12 мм, что примерно равно значению, получаемому при использовании сварочного выпрямителя ВДУ-504 ($U_{х.х}$ = 80 В) и электродов данной марки.

Трансформатор «Разряд-250» обеспечивает также надежное начальное зажигание электрода при первом же контакте торца электрода и поверхности изделия, причем независимо от вида покрытия. Он позволяет проводить начальное зажигание электрода через втулку покрытия при использовании высокопроизводительных электродов. Паузы в горении дуги, после которых этот трансформатор обеспечивает надежное начальное зажигание через втулку покрытия, могут быть больше, чем при использовании трансформатора СТШ-500/80.

Применение ИСГД позволяет также улучшить измерители расплавления: уменьшить коэффициент потерь и соответственно на 5—10 % повысить коэффициент наплавки.

Учитывая повышенную опасность поражения сварщика током, стабилизирующее устройство отключается спустя 0,5—2 с после окончания сварки и включается при первом же контакте торца электрода и изделия.

Применение ИСГД способствует расширению номенклатуры покрытых электродов, пригодных для сварки на переменном токе, а также позволяет в дальнейшем частично заменить сварку постоянным током на сварку переменным с очевидной в этом случае экономической эффективностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологические особенности дуговой сварки в значительной мере определяются процессами в дуге, имеющими особо важное значение в приэлектродных областях дуги.

Введение в состав электродных покрытий различных веществ, прежде всего соединений легкоионизируемых, а также электроотрицательных элементов, позволяет в широких пределах регулировать технологические параметры процесса сварки. Изменение эмиссионных характеристик электродных покрытий, флюсов и шлаков, в частности снижение работы выхода электронов, позволяет значительно повысить стабильность горения дуги.

Термоионная эмиссия и поверхностная ионизация легкоионизируемых элементов способствуют компенсации объемного отрицательного заряда у катода и повышению надежности повторного зажигания дуги при сварке на переменном токе. При повышении концентрации положительных ионов наблюдается снижение анодного падения напряжения. Это может привести к уменьшению энерговыделения на электродах и снижению скорости их плавления.

Введение в разрядный промежуток электроотрицательных элементов, вызывает повышение концентрации отрицательных ионов в дуге, что приводит к контрагированию столба дуги и резкому возрастанию анодного падения напряжения. Это один из возможных путей увеличения глубины провара металла в случае сварки на прямой полярности тока.

Состав покрытия, род и полярность тока оказывают большое влияние также на характер плавления и переноса электродного металла, которые в свою очередь определяют технологические особенности процесса сварки — форму шва, разбрызгивание, возможность сварки в различных пространственных положениях и др.

Композиции сварочных материалов — электродов, флюсов, проволок — многокомпонентны, сложны и, как правило, представляют собой оптимум, в той или иной мере удовлетворяющий совокупность требований, предъявляемых к сварочному материалу.

Достаточно надежно некоторые технологические свойства материалов можно оценить с помощью двух показателей: минимального напряжения холостого хода сварочного трансформатора $U_{х.х}^{мин}$, при котором дуга горит еще без отрывов, и усредненной длительности коротких замыканий дугового промежутка $\tau_{к.з}^{ср}$, сопровождающихся переносом электродного металла.

Эти показатели характеризуют такие свойства, как надежность начального и повторного зажигания, стабильность и эластичность дуги, возможность сварки во всех пространственных положениях, минимально возможный ток сварки и др.

Снижение значений $U_{х.х}^{мин}$ и $\tau_{к.з}^{ср}$, достигаемое различными путями, приводит к повышению стабильности и надежности процесса дуговой сварки. Этого можно достичь увеличением (в определенных пределах) плотности сварочного тока; варьированием состава покрытия, например, увеличением общего содержания

$CaCO_3$ или соотношения $CaCO_3/CaF_2$ в покрытиях основного вида; повышением соотношения K_2O/Na_2O в покрытиях, флюсах, порошковых проволоках; раскислением покрытий, флюсов и шлаков ферротитаном, ферроцирконием, повышением коэффициента массы электродного покрытия; применением двухслойных покрытий, в которых фториды выведены в наружный слой и некоторыми другими путями.

Введение в основные шлаки (покрытия) больших количеств SiO_2 или TiO_2 приводит к образованию летучих фторидов SiF_4 и TiF_4, которые способствуют увеличению концентрации молекулярных отрицательных ионов в дуге и снижению ее стабильности.

Технологическими характеристиками дуговой сварки можно управлять также за счет повышения плотности тока при начальном зажигании электрода («горячий старт»), регулируя амплитудное значение тока короткого замыкания и скорость его изменения за счет импульсов тока; изменения наклона внешней вольт-амперной характеристики или перехода в момент короткого замыкания дугового промежутка на другую вольт-амперную характеристику; регулирования индуктивности сварочного контура.

При различных способах сварки эффективность отдельных методов различна. Так наложение импульсов тока и изменение индуктивности сварочного контура при сварке покрытыми электродами мало эффективно. В то же время этот процесс широко используется при газоэлектрической сварке прежде всего в газовых смесях на основе аргона.

При сварке покрытыми электродами эффективно регулирование тока, короткого замыкания путем перехода в момент КЗ на другую вольт-амперную характеристику. Существенно улучшить стабильность горения дуги переменного тока можно, используя импульсные стабилизаторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акулов А. И.* Некоторые энергетические параметры дуги в аргоне с плавящимся электродом // Автомат. сварка.— 1966.— № 7.— С. 23—27.
2. *Алдохин В. Н., Батанов Г. М., Бережицкая Н. К. и др.* Униполярная дуга в горячей плазме // Физика плазмы.— 1982.— 8, № 1.— С. 182—188.
3. *Алов А. А.* Основы теории процессов сварки и пайки.— М. :Машиностроение, 1964.— 272 с.
4. *Аппен А. А.* Химия стекла.— Л. . Химия, 1974.— 251 с.
5. *Андреее В. В., Латанский В. П., Склифос В. В. и др.* Приставка к выпрямителям типа ВДУ для «горячего старта» при ручной сварке.— Киев, 1983.— 2 с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 10 (1354)).
6. *Арлаускас В. Ю., Нарушкевичюс И. Р.* Количественная оценка стабильности повторного возбуждения сварочной дуги // Автомат. сварка.— 1974.— № 8.— С. 9—10.
7. *Арсламбеков В. А.* О механизме образования первичных окисных пленок на металлах // Механизм взаимодействия металлов с газами.— М., 1964.— С. 21—49.
8. *Бадьянов Б. Н., Давыдов В. А., Иванов В. А.,* Колупаев Ю. Ф. Выбор состава газовой смеси для увеличения проплавляющей способности дуги // Свароч. пр-во.— 1977.— № 4.— С. 26—28.
9. *Бадьянов Б. Н., Давыдов В. А., Колупаев Ю Ф., Ткачев М. А.* Изменение размеров зоны электропроводности дуги при введении газообразных галогенидов в аргон // Автомат. сварка.— 1977.— № 4.— С. 67—68.
10. *Бадьянов Б. Н., Давыдов В. А., Колупаев Ю. Ф.* Использование газообразных галоидных соединений при сварке плавлением // Свароч. пр-во.— 1982.— № 4.— С. 16—17.
11. *Байдов В. В.* Ультраакустические исследования микроструктуры силикатных расплавов // Свойства и структура шлаковых расплавов.— М., 1970.— С. 23—28.
12. *Бак Т.* Действие фтористого кальция на шлаки // Физическая химия сталеварения.— М., 1963.— С. 141—144.
13. *Безбах Д. К.* О кинетике насыщения газами при некоторых способах сварки плавлением // Свароч. пр-во.— 1965.— № 10.— С. 14—16.
14. *Бейлис И. И., Раховский В. И.* К теории катодного механизма дуги // Теплофизика высок. температур.— 1969.— 7, № 4.— С. 620—625.
15. *Беляков-Бодин И. Б., Мандельштам С. Л.* Температура дуги между железными электродами // Журн. техн. физики.— 1940.— 10, вып. 4.— С. 332—336.
16. *Бердичевский М. Г., Мартыненко Н. В., Росляков О. А., Смирнов В. В.* Регистратор параметров сварочных режимов и его производственная эксплуатация.— Л. : ЛДНТП.— 1970.— 24 с.
17. *Бережной А. С.* Многокомпонентные системы окислов.— Киев : Наук. думка.— 1970.— 542 с.
18. *Браун С.* Элементарные процессы в плазме газового разряда.— М. : Госатомиздат, 1961.— 323 с.
19. *Броун М. Я., Погодин Г. И.* Температура электросварочной дуги постоянного тока // Юбилейный сборник, посвященный Е. О. Патону.— Киев, 1951.— С. 285—295.
20. *Броун М. Я., Погодин-Алексеев Г. И.* Термическая теория электросварочной дуги.— М. : Машгиз, 1951.— 124 с.
21. *Брусницын Ю. Д.* К вопросу о физико-химических процессах в керамических сварочных флюсах и электродных покрытиях на шлаковой основе мрамор — плавиковый шпат / Сварка: Сб.— М., 1959.— С. 95—109.
22. *Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И.* Взрывная эмиссия электронов // Успехи физ. наук.— 1975.— 115, вып. 1.— С. 101—120.
23. *Будников П. П., Гинстлинг А. М.* Реакции в смесях твердых веществ.— М. : Стройиздат.— 1965.— 474 с.
24. *Буштедт П. П., Кульберг Л. М.* Дослідження стабілізації зварної дуги і методи будування стабілізуючих обмазок.— К. : Вид-во АН УРСР, 1936.— 73 с.
25. *Быков А. Н., Ерохин А. А.* Характер переноса при сварке покрытыми электродами // Свароч. пр-во.— 1963.— № 7.— С. 1—4.

26. *Быков А. Н., Ерохин А. А.* Металлургические процессы окисления ферромарганца в электродных покрытиях при их нагреве // Автомат. сварка.— 1961.— № 9.— С. 10.
27. *Васютинский А. А.* Титановые шлаки.— М. Металлургия, 1972.— 208 с.
28. *Вакуумные* дуги: Теория и прилож. / Под ред. Дж. Лафферти.— М. Мир, 1982 — 428 с.
29. *Венецкий И. Г., Кильдишев Г. С.* Основы теории вероятностей и математической статистики.— М. : Статистика, 1968.— 360 с.
30. *Войткевич В. Г., Безрук Л. И., Есауленко Г. Б.* Электронно-микроскопическое исследование твердой составляющей сварочных аэрозолей // Автомат. сварка.— 1984.— № 6. — С. 33—35.
31. *Ворновицкий И. Н.* Влияние обрывов дуги на образование пор при сварке электродами с фтористокальциевым покрытием // Там же.— 1971.— № 2.— С. 41—42.
32. *Гвоздецкий В. С., Васенин Ю. Л.* К вопросу об ионэлектронном (*J — F — T*) механизме эмиссии // Поверхность : Физика, Химия. Механика.— 1985.— № 3.— С. 15—19.
33. *Гвоздецкий В. С.* К теории катодных процессов в электрической дуге // Автомат. сварка.— 1969.— № 1.— С. 33—37; № 6.— С. 1—4.
34. *Горпенюк В. Н., Макаренко В. Д., Пономарев В. Е. и др.* Исследование стабилизирующих свойств покрытий основных электродов с помощью *G*-квазиоптимального плана эксперимента // Тез. докл. Всесоюз. конф. по свароч. материалам, Череповец, 10—14 окт. 1983 г.— Киев, 1983.— С. 4—6.
35. *Горпенюк В. Н., Макаренко В. Д.* Влияние толщины покрытия на сварочно-технологические свойства электродов с фтористокальциевым покрытием // Пути повышения эффективности, качества и надежности в сварочном производстве : Тез. докл. зон. науч.-техн. конф., 20—21 нояб. 1979 г., Красноярск, 1979.— С. 23—24.
36. *Горпенюк В. Н., Миличенко С. С., Марченко А. Е. и др.* Пути улучшения сварочно-технологических свойств фтористокальциевых электродов для монтажной сварки // Тр. Всесоюз. конф. по свароч. материалам, Орел, окт. 1979 г.— Киев, 1982.— С. 92—95.
37. *Горпенюк В. Н., Пономарев В. Е., Андреев В. В., Латанский В. П.* Исследование «горячего» старта для уменьшения пористости начальных участков швов при сварке электродами с основным покрытием // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки: Материалы науч. техн. конф. — Киев, 1984.— С. 13—15.
38. *Грановский В. Л.* Электрический ток в газе.— М. : Наука, 1971.— 543 с.
39. *Гримли Т.* Окисление металлов // Химия твердого состояния. М. : Изд-во иностр. лит., 1961.— С. 446—486.
40. *Денисов С. И.* Электротермия титановых шлаков.— М. : Металлургия, 1970.— 174 с.
41. *Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В.* Эмиссионная электроника.— М. : Наука, 1966.—564 с.
42. *Донченко Е. А., Панасенко Л. Х.* Повышение устойчивости процесса сварки на переменном токе электродами УОНИ // Автомат. сварка.— 1973.— № 8.— С. 74.
43. *Дудников В. Г.* Поверхностно-плазменный метод получения отрицательных ионов и ускоренных атомов // Физика электронных и атомных столкновений.— Л., 1980.— С. 227—233.
44. *Дятлов В. И.* Вольт-амперная характеристика сжатой электрической дуги // Автомат. сварка.— 1961.— № 1.— С. 17—23.
45. *Дятлов В. И.* Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке // Новые проблемы сварочной техники.— Киев, 1964.— С. 167.
46. *Дятлов В. І., Фрумін І. І.* Стабілізуючі покриття для автозварювання на змінному струмі.— К. : Вид-во АН УРСР, 1940.— 48 с.
47. *Елютин В. П., Павлов Ю. А.* Высокотемпературные материалы.— М. : Металлургия, 1972.— 167 с.
48. *Еременко В. Н.* Титан и его сплавы.— Киев : Изд-во АН УССР, 1960.— 500 с.
49. *Ерохин А. А.* Кинетика металлургических процессов дуговой сварки.— М. : Машиностроение, 1964.— 254 с.
50. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением.— М. : Машиностроение, 1973.— 448 с.
51. *Ерохин А. А.* Металлургия сварки // Сварка в машиностроении: (Справ.) // Под ред. Н. А. Ольшанского.— М., 1978.— Т. 1.— С. 62—96.
52. *Ерохин А. А.* Дуговая сварка покрытыми электродами // Сварка в СССР.— М., 1981.— Т. 1.— С. 198—216.
53. *Ерошенко Л. Е., Замков В. Н., Мечев В. С., Прилуцкий В. П.* Исследование спектра дуговой плазмы при аргонодуговой сварке титана вольфрамовым электродом по флюсу // Автомат. сварка.— 1980.— № 9.— С. 23—25.
54. *Есин О. А., Гельд П. В.* Физическая химия пирометаллургических процессов.— М. : Металлургиздат.— 1962—1966.— Ч. 1—2.
55. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Гуревич С. М.* Влияние состава флюса на процесс сварки титана неплавящимся электродом // Автомат. сварка.— 1977.— № 4.— С. 22—26.
56. *Зандберг Э. Я., Ионов Н. И.* Поверхностная ионизация.— М. : Наука, 1969.— 432 с.
57. *Заруба И. И., Дыменко В. В.* Влияние капельного переноса металла на устойчивость сварочной дуги переменного тока // Автомат. сварка.— 1983.— № 12.— С. 14—20.
58. *Заруба И. И., Дыменко В. В.* Стабилизатор дуги для ручной дуговой сварки переменным током // АН УССР. ИЭС им. Е. О. Патона // Информ. письмо.— 1975.— № 13.— 2 с.
59. *Заруба И. И., Дыменко В. В., Болотько В. И.* Автономный стабилизатор горения дуги на 100 Гц (СД-3) // АН УССР. ИЭС им. Е. О. Патона // Информ. письмо.— 1982.— № 38.— 4 с.
60. *Заруба И. И., Дыменко В. В., Болотько В. И.* Применение стабилизаторов горения дуги с целью понижения напряжения холостого хода трансформаторов для ручной ду-

говой сварки // Автомат. сварка.— 1982.— № 10.— С. 27—31.
61. *Заруба И. И., Дыменко В. В., Корицкий В. А.* Источник питания сварочной дуги «Разряд-250» (И-120).— Киев, 1979.— 4 с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 10).
62. *Заруба И. И., Дыменко В. В., Корицкий В. А. и др.* Источник питания типа «Разряд» со стабилизацией дуги и модуляцией тока с пониженным напряжением холостого хода.— Киев, 1983.— 2 с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 31).
63. *Заруба И. И., Касаткин Б. С., Каховский Н. И., Потапьевский А. Г.* Сварка в углекислом газе.— Киев Техніка, 1966.— 292 с.
64. *Заруба И. И., Троицкий В. А., Пентегов И. В.* Источник питания для сварки переменным током типа «Разряд-250». — Киев, 1976.— 4 с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 13).
65. *Звездин С. М., Бондаренко О. П., Поповский В. Ю.* Информационно-измерительная система для контроля параметров процесса сварки и наплавки // Автомат. сварка.— 1985.— № 12.— С. 54—56.
66. *Калмыков В. А., Агеев П. Я., Вальдман О. А.* Термоэлектронные свойства кислых шлаков // Изв. вузов. Чер. металлургия.— 1964.— № 12.— С. 5—9.
67. *Калмыков В. А., Агеев П. Я.* Влияние термоэлектронных свойств шлаков на межфазные процессы в системе газ — шлак — металл // Там же.— 1969.— № 8.— С. 10—13.
68. *Касаткин О. Г.* К вопросу построения *D*-оптимальных планов на симплексе // Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем.— М., 1974.— С. 64—69.
69. *Катлер А. И.* Кинетика термического разложения некоторых минералов // Кинетика высокотемпературных процессов: Сокр. пер. с англ. / Под ред. В. Д. Киндерн.— М., 1965.— С. 31—52.
70. *Кесаев А. Г.* Катодные процессы электрической дуги.— М. : Наука.— 1968.— 244 с.
71. *Кирдо И. В.* О физических процессах при повторном зажигании дуги переменного тока // Автомат. сварка.— 1956.— № 3.— С. 1—16.
72. *Кирдо И. В.* Определение температуры мощной сварочной дуги, горящей под флюсом // Юбилейный сборник, посвященный Е. О. Патону.— Киев, 1951.— С. 269—284.
73. *Кирдо И. В.* О механизме повторного зажигания сварочной дуги переменного тока // Автомат. сварка.— 1956.— № 6.— С. 38—54.
74. *Китайгородский И. И., Качалов Н. Н., Варгин В. В. и др.* Технология стекла.— М. : Стройиздат, 1967.— 564 с.
75. *Козлов Н. П., Хвесюк В. И.* К теории катодных процессов электрических дуг // Журн. техн. физики.— 1971.— **41**, № 10.— С. 2135—2150.
76. *Корицкий Г. Г., Походня И. К.* Влияние состава карбонатно-флюоритового покрытия на перенос электродного металла // Автомат. сварка.— 1971.— № 7.— С. 17—19.
77. *Корицкий Г. Г., Походня И. К.* О некоторых силах, действующих на каплю электродного металла при сварке // Там же.— № 3.— С. 11—14.
78. *Кривонос В. П., Галигузов А., Горпенюк В. Н.* Защита шлейфов осциллографа при измерении температуры капель электродного металла // Там же.— 1967.— № 6.— С. 75—76.
79. *Кринберг И. А., Смирнова Е. В.* Радиальные распределения основных характеристик плазмы в столбе свободно горящей электрической дуги // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. Сер. техн. наук.— 1968.— Вып. 3, № 13.— С. 8—15.
80. *Кузмак Е. М.* Вопросы шихтования электродных покрытий // Автоген. дело.— 1938.— № 12.— С. 6—9.
81. *Кузьменко В. Г.* Особенности реакции взаимодействия фтористого кальция и кремнезема при 800...1900 °С // Автомат. сварка.— 1980.— № 6.— С. 33—35.
82. *Кулагин И. Д., Николаев А. В.* Определение плотности тока в пятнах сварочной дуги // Тр. ин-та металлургии им. А. А. Байкова.— 1958.— Вып. 3.— С. 250—261.
83. *Кульчицкий Л. О.* Энергетический баланс дуги при сварке металлическими электродами.— М. Изд-во АН СССР.— 1941.— 86 с.
84. *Куляпин В. М.* Элементы количественной теории катодных процессов дугового разряда // Журн. техн. физики.— 1971.— **41**, № 2.— С. 381—386.
85. *Кушлейко Р.* Метод оценки стабильности сварочного процесса // Информ. материалы СЭВ.— Киев, 1977.— Вып. 2.— С. 183—185.
86. *Лакатош Л., Калчик А.* Исследование сварочно-технологических свойств покрытых электродов // Там же.— 1979.— Вып. 2.— С. 122—128.
87. *Лапидус В. А.* О механизме легирования наплавленного металла // Автоген. дело.— 1950.— № 12.— С. 16—20.
88. *Лапин И. Л., Туркин П. С., Самсонов В. И.* Влияние плавикового шпата на структуру дуги, горящей в атмосфере воздуха // Сварочн. пр-во.— 1978.— № 4.— С. 1—2.
89. *Лапчинский В. Ф., Потапьевский А. Г., Стебловский Б. А., Вайнерман А. Е.* Импульсно-дуговая сварка алюминиевых сплавов в аргоне // Автомат. сварка.— 1966.— № 7.— С. 50—53.
90. *Лебедев В. К., Медведенко Н. Ф.* Автоматизация измерений переходных процессов в электрических печах при дуговой сварке с короткими замыканиями // Там же.— 1971.— № 10.— С. 1—2.
91. *Лебедев В. К., Сидоренко М. Н.* О динамических свойствах источников питания постоянного тока для ручной дуговой сварки // Новые проблемы сварочной техники.— Киев, 1964.— С. 216—224.
92. *Леб Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах.— М. ; Л. : Гостехиздат, 1950.— 672 с.

93. *Левитин С. М.* Влияние ускоряющего поля в поверхностном слое катода на его термоэлектронную эмиссию // Журн. техн. физики.— 1953.— **23**, № 10.— С. 1700—1711.
94. *Левитин С. М.* Влияние ускоряющего поля в поверхностном слое катода на токопрохождение в электронных лампах // Там же.— № 12.— С. 2166—2175.
95. *Лейначук Е. И.* Влияние легкоионизируемых элементов на стабилизирующие свойства флюсов // Автомат. сварка.— 1950.— № 1.— С. 78—81.
96. *Лесков Г. И.* О роли термоэлектронной эмиссии и термической ионизации в стабилизации дуги в CO_2 // Там же.— 1961.— № 10.— С. 20—29.
97. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга.— М. : Машиностроение, 1970.— 336 с.
98. *Лившиц Б. Г.* Физические свойства металлов и сплавов.— М. : Машгиз, 1956.— 352 с.
99. *Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Парфенов А. Г.* О природе взрывной электронной эмиссии // Докл. АН СССР.— 1983.— **269**, № 2.— С. 343—345.
100. *Лугин В. П.* Сравнительная характеристика стабильности горения дуги при сварке штучными электродами переменным током // Свароч. пр-во.— 1975.— № 1.— С. 39—40.
101. *Любимов Г. А.* О моделях, описывающих прикатодную область сильноточного дугового разряда // Журн. техн. физики.— 1973.— **43**, № 4.— С. 888—893.
102. *Мадэй К., Фрумин И. И., Кондратьев И. А.* Влияние марганца на перенос электродного металла при плавлении высокомарганцевой порошковой проволоки // Автомат. сварка.— 1977.— № 9.— С. 18—20.
103. *Мазель А. Г.* К вопросу об электропроводности и стабильности дуги при сварке // Там же.— 1960.— № 12.— С. 54—59.
104. *Мазель А. Г.* Технологические свойства электросварочной дуги.— М. : Машиностроение, 1969.— 178 с.
105. *Мазель А. Г., Гобарев Л. А., Пумпурс В. М.* Эмиссионные характеристики сварочных флюсов // Свароч. пр-во.— 1971.— № 3.— С. 7—9.
106. *Мазель А. Г., Пумпурс В. М.* Эмиссионные свойства сварочных материалов при дуговой сварке // Автомат. сварка.— 1983.— № 12.— С. 30—32.
107. *Мазель А. Г., Рогова Е. М., Сорокин Л. И.* Исследование новых электродов для сварки трубопроводов и других конструкций из малоуглеродистой и низколегированной стали.— М. : ВНИИСТГлавгаз, 1960.— 32 с.
108. *Макаренко В. Д., Тараборкин Л. А., Товмаченко В. Н.* Оценка термодинамической вероятности образования тетрафторидов Ti и Si в шлаках электродов с основным покрытием // Тез. докл. Всесоюз. конф. по свароч. материалам, Череповец, 10—14 окт. 1983 г.— Киев, 1983.— С. 11—12.
109. *Мак-Даниель И.* Процессы столкновений в ионизованных газах.— М. : Мир, 1967.— 832 с.
110. *Марченко А. Е.* Электроды для ручной дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей.— Киев : Наук. думка, 1976.— 73 с.
111. *Математическая* статистика // Под ред. В. М. Ивановой.— М. : Высш. шк., 1981.— 371 с.
112. *Медовар Б. И.* Сварка хромникелевых аустенитных сталей.— М. : Машгиз, 1958.— 339 с.
113. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. С. М. Гуревича.— Киев : Наук. думка, 1979.— 299 с.
114. *Мечев В. С.* Блуждание дуги при сварке плавящимся электродом // Свароч. пр-во.— 1984.— № 4.— С. 5—7.
115. *Мечев В. С., Ерошенко Л. Е.* Радиальное распределение температуры электрической дуги в аргоне // Автомат. сварка.— 1975.— № 3.— С. 6—9.
116. *Миличенко С. С., Горпенюк В. Н.* Стабильность горения дуги при сварке электродами с двухслойным покрытием // Сб. тр. Всесоюз. конф. по свароч. материалам.— Киев, 1982.— С. 28—32.
117. *Михайлов М. А.* Термодинамическое исследование системы $CaF_2 — SiO_2 — H_2O_{пар}$ // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР.— 1959.— № 4.— С. 71—76.
118. *Михайлов М. А., Ведерникова Т. И.* Пирогидролиз фтористого кальция и флюорита в динамических условиях с добавкой двуокиси кремния // Там же.— № 3.— С. 49—61.
119. *Михайлов М. А., Ожигов Е. П.* Разложение фторидов металлов второй группы перегретым паром // Сообщ. Дальневост. фил. им. В. А. Комарова АН СССР.— 1958.— Вып. 9.— С. 21—25.
120. *Нагайбеков Р. Б.* О процессах ионизации и переразрядки ионов в катодном пятне дугового разряда в вакууме // Журн. техн. физики.— 1971.— **41**, № 11.— С. 2350—2352.
121. *Невский А. П., Шараховский Л. И., Ясько О. И.* Взаимодействие дуги с электродами плазмотрона.— Минск : Наука и техніка, 1982.— 152 с.
122. *Ниженко В. И., Флока Л. И.* Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов.— М. : Металлургия, 1981.— 208 с.
123. *Никитин В. П.* Основы теории трансформаторов и генераторов для дуговой сварки.— М. : Изд-во АН СССР, 1956.— 238 с.
124. *Ондрейчек П., Виниш Ф., Словак Я.* Применение анализатора VUZ-A1 при сварке в среде CO_2 // Информ. материалы СЭВ.— Киев 1985.— Вып. 2.— С. 71—77.
125. *Острецов И. И., Петросов В. А., Поротников А. А., Родневич Б. В.* Влияние индивидуальных полей ионов на автотермоэмиссию ($J — F — T$-эмиссия) в области сильных полей // Теплофизика высоких температур.— 1974.— **12**, № 4.— С. 882—883.
126. *Патон Б. Е.* Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом // Сб. тр. по автомат. сварке

под флюсом // ИЭС им. Е. О. Патона.— 1948.— № 3.— С. 13—28.— 1949.— № 4.— С. 22—38.
127. *Патон Б. Е.* О размере электродных капель при сварке под флюсом // Автомат. сварка.— 1950.— № 4.— С. 45—48.
128. *Патон Б. Е.* О напряжении холостого хода трансформаторов для электродуговой сварки // Там же.— № 1.— С. 60—77.
129. *Патон Б. Е.* Об оценке стабилизирующих свойств флюса для автоматической сварки // Там же.— № 2.— С. 85—89.
130. *Патон Б. Е.* Исследование условий устойчивого горения сварочной дуги и ее регулирования : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.— Киев, 1951.— 30 с.
131. *Патон Б. Е., Воропай Н. М.* Сварка активированным плавящимся электродом в защитном газе // Автомат. сварка.— 1979.— № 1.— С. 1—7.
132. *Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Васенин Ю. Я.* Эмиссия электронов при испарении легкоионизируемых добавок материала катода // Там же.— 1986.— № 11.— С. 1—9.
133. *Патон Б. Е., Лебедев В. К.* Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки.— М. : Машиностроение, 1966.— 359 с.
134. *Патон Б. Е., Слуцкая Т. М.* Дуговая сварка голой легированной проволокой без защитной среды // Автомат. сварка.— 1962.— № 6.— С. 1—5.
135. *Патон Б. Е., Шейко П. П.* Управление переносом металла при дуговой сварке плавящимся электродом // Там же.— 1965.— № 5.— С. 1—7.
136. *Пацкевич И. Р.* Исследование размеров электродных капель при ручной дуговой сварке // Там же.— 1954.— № 1.— С. 44—47.
137. *Пацкевич И. Р.* Работы кафедры сварочного производства ЧПИ по развитию вибродуговой наплавки // Докл. конф науч. работников, посвящ. 50-летию Сов. власти.— Челябинск, 1967.— С. 3—15.
138. *Перегуд Е. Л.* Химический анализ воздуха.— М. : Химиздат, 1977.— 308 с.
139. *Петров А. В.* Давление дуги на сварочную ванну в среде защитного газа // Автомат. сварка.— 1955.— № 4.— С. 84—89.
140. *Підгаєцький В. В.* Пори, включення і тріщини в зварних швах.— К. : Техніка, 1970.— 236 с.
141. *Подгаецкий В. В.* Реакции в атмосфере дуги при сварке под флюсом // Автомат. сварка.— 1953.— № 1.— С. 10—18.
142. *Подгаецкий В. В., Новикова Т. П.* О выделении фтористого кремния при нагреве флюса в процессе сварки и при сушке // Там же.— 1960.— № 6.— С. 19—22.
143. *Покровский В. В., Калмыков В. А., Агеев П. Я.* Методика измерения работы выхода электронов шлаковых расплавов // Завод. лаб.— 1968.— 34, № 5.— С. 560—561.
144. *Покровский В. В., Калмыков В. А., Каялова С. С. и др.* Термоэлектронные свойства и поверхностное натяжение силикатных расплавов // Поверхностные явления в расплавах.— Киев, 1968.— С. 269—272.
145. *Попель С. И.* Межфазное натяжение железа его расплавов на границе с оксидными системами // Теория металлургических процессов: (Сб. УПИ им. С. М. Кирова).— М., 1963.— С. 44—50.
146. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом.— М. : Машиностроение, 1974.— 240 с.
147. *Потапьевский А. Г.* К вопросу определения динамических свойств источников тока для сварки в углекислом газе // Автомат. сварка.— 1962.— № 7.— С. 43—49.
148. *Походня И. К.* Газы в сварных швах.— М. : Машиностроение, 1972.— 255 с.
149. *Походня И. К.* Метод исследования процесса плавления и переноса электродного металла при сварке // Автомат. сварка.— 1964.— № 2.— С. 1—10.
150. *Походня И. К.* Электроды для сварки малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей // Всесоюз. конф. по электродному пр-ву (26—30 сент. 1966 г.) : Тез. докл.— Киев, 1966.— Кн. 1.— С. 64—135.
151. *Походня И. К., Булат А. В., Явдошин И. Р. и др.* Особенности испарения натрия, калия, магния и кальция из сварочных шлаков, содержащих двуокись титана // Автомат. сварка.— 1986.— № 3.— С. 27—29.
152. *Походня И. К., Горпенюк В. Н.* Влияние режима сварки на температуру капель электродного металла // Там же.— 1969.— № 8.— С. 9—11.
153. *Походня И. К., Горпенюк В. Н., Марченко А. Е. и др.* Исследование оперативных свойств покрытых электродов с помощью анализатора нестационарных процессов // Информ. материалы СЭВ.— Киев, 1979.— Вып. 2.— С. 157—168.
154. *Походня И. К., Горпенюк В. Н., Миличенко С. С. и др.* Метод и аппаратура для исследования оперативных свойств сварочных материалов // Сб. Всесоюз. конф. по свароч. материалам.— Киев, 1982.— С. 18—24.
155. *Походня И. К., Горпенюк В. Н., Миличенко С. С. и др.* Некоторые пути улучшения характера переноса металла при сварке электродами с основным покрытием // Автомат. сварка.— 1985.— № 1.— С. 30—33, 36.
156. *Походня И. К., Горпенюк В. Н., Офенгенден Р. Г. и др.* Статистические методы измерения электрических и временных параметров сварочного контура при дуговой сварке постоянным током // Информ. материалы СЭВ.— Киев, 1985.— Вып. 2.— С. 63—68.
157. *Походня И. К., Заруба И. И., Андреев В. В. и др.* Применение системы АНП-2 для измерения электрических и временных параметров сварочного контура // Там же.— С. 68—70.
158. *Походня И. К., Корицкий Г. Г.* Влияние толщины покрытия на характеристики переноса электродного металла // Свароч. пр-во.— 1970.— № 8.— С. 32—33.

159. *Походня И. К., Костенко Б. А.* Исследование кинетики плавления электродов при сварке // Автомат. сварка.— 1965.— № 4.— С. 11—14.
160. *Походня И. К., Костенко Б. А.* Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом // Автомат. сварка.— 1965.— № 10.— С. 16—22.
161. *Походня И. К., Макаренко В. Д., Горпенюк В. Н. и др.* Взаимосвязь между длительностью коротких замыканий и массой электродных капель // Автомат. сварка.— 1983.— № 9.— С. 28—31.
162. *Походня И. К., Макаренко В. Д., Горпенюк В. Н. и др.* Исследование особенностей переноса металла и стабильности горения дуги при сварке электродами с основным покрытием // Там же.— 1984.— № 4.— С. 1—5.
163. *Походня И. К., Макаренко В. Д., Миличенко С. С.* Влияние толщины и эксцентричности покрытия на сварочно-технологические свойства электродов и качество наплавленного металла // Информ. материалы СЭВ.— Киев, 1985.— Вып. 2.— С. 83—88.
164. *Походня И. К., Миличенко С. С., Горпенюк В. Н., Марченко А. Е.* Улучшение характеристик переноса металла фтористокальциевых электродов с помощью двухслойного покрытия // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки: Материалы науч.-техн. конф., Жданов, июнь 1983 г.— Киев, 1984.— С. 3—4.
165. *Походня И. К., Миличенко С. С., Горпенюк В. Н. и др.* Влияние состава связующего в покрытии электродов основного вида на их сварочно-технологические свойства // Автомат. сварка.— 1986.— № 5.— С. 27—29.
166. *Походня И. К., Миличенко С. С., Макаренко В. Д. и др.* Влияние диаметра электрода и пространственного положения шва на характер переноса электродного металла при сварке фтористокальциевыми электродами // Автомат. сварка.— 1984.— № 7.— С. 67—68.
167. *Походня И. К., Марченко А. Е., Миличенко С. С., Горпенюк В. Н.* Электроды АНО-Д основного вида для монтажной сварки // Всесоюз. конф. по свароч. материалам, Череповец, 10—14 окт. 1983 г.: Тез. докл.— Киев, 1983.— С. 71—72.
168. *Походня И. К., Марченко А. Е., Костенко Б. А.* Продолжительность взаимодействия жидкого металла со шлаком и газами при сварке // Автомат. сварка.— 1965.— № 5.— С. 8—10.
169. *Походня И. К., Офенгенден Р. Г., Горпенюк В. Н. и др.* Информационно-измерительная система для исследования технологических свойств сварочных материалов, оборудования и процессов сварки // Автомат. сварка.— 1979.— № 10.— С. 67—68.
170. *Походня И. К., Пономарев В. Е., Миличенко С. С. и др.* Влияние типа и состава связующего на сварочно-технологические свойства электродов с основным покрытием // — 1986.— № 4.— С. 33—35.
171. *Походня И. К., Стародубцев Л. В.* Отрицательные ионы в межэлектродном промежутке и повторное зажигание дуги переменного тока // Тр. Всесоюз. конф. по свароч. материалам.— Киев, 1982.— С. 58—61.
172. *Походня И. К., Стародубцев Л. В., Швачко В. И. и др.* Эмиссия положительных ионов сварочными шлаками и ее влияние на стабильность дуги переменного тока // Автомат. сварка.— 1980.— № 4.— С. 24—27.
173. *Походня И. К., Суптель А. М.* Теплосодержание капель электродного металла при дуговой сварке в защитных газах // Там же.— 1967.— № 2.— С. 13—18.
174. *Походня И. К., Швачко В. И., Стародубцев Л. В. и др.* Эмиссионные свойства фторсодержащих шлаков и условия повторного зажигания дуги переменного тока // Там же.— 1972.— № 11.— С. 1—4.
175. *Походня И. К., Швачко В. И., Устинов В. Г., Супрун С. А.* Масс-спектрометрическое исследование газообразных фторидов, выделяющихся при дуговой сварке // Там же.— 1972.— № 6.— С. 10—12.
176. *Рабинович В. А., Хавин З. Я.* Краткий химический справочник.— Л. : Химия.— 1977.— 376 с.
177. *Рабинович И. Я.* Оборудование для дуговой электрической сварки : Источники питания.— М. : Машгиз, 1958.— 380 с.
178. *Рабкин Д. М.* Потери фтора при плавке автосварочных флюсов // Тр. по автомат. сварке под флюсом.— 1949.— Сб. № 8.— С. 55—64.
179. *Рабкин Д. М.* Энергетическое исследование приэлектродных областей мощной сварочной дуги // Автомат. сварка.— 1951.— № 12.— С. 3—25.
180. *Рабкин Д. М., Медовар Б. И.* К вопросу о стабилизирующих свойствах сварочных флюсов // Автоген. дело.— 1946.— № 5/6.— С. 9—10.
181. *Рабкин Д. М., Медовар Б. И., Аснис А. Е.* О влиянии окисленности флюса на его сварочные свойства // Автомат. сварка.— 1950.— № 1.— С. 30—39.
182. *Раховский В. И.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме.— М. : Наука, 1970.— 536 с.
183. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке.— М. : Машгиз, 1951.— 296 с.
184. *Рысс И. Г.* Химия фтора и его неорганических соединений.— М. : Госхимиздат, 1956.— 718 с.
185. *Савицкий М. М., Лесков Г. И.* Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом // Автомат. сварка.— 1980.— № 9.— С. 17—22.
186. *Сагиров Х. Н., Дюргеров Н. Г., Ленивкин В. А.* Прибор для измерения частоты коротких замыканий дугового промежутка // Свароч. пр-во.— 1970.— № 2.— С. 47—48.

187. *Семенова О. П.* К вопросу о механизме дугового разряда // Докл. АН СССР. Н. С.— 1946.— **51**, № 9.— С. 683—686.
188. *Семенова О. П.* Об эффективном ионизационном потенциале смеси при термической ионизации // Изв. вузов. Физика.— 1958.— № 1.— С. 95—100.
189. *Семенова О. П., Петрова М. П.* К вопросу о влиянии атмосферы на излучение дугового разряда // Там же.— 1961.— № 2.— С. 71—76; 1962.— № 1.— С. 111—117.
190. *Симоник А. Г.* Влияние галогенидов на эффект проплавления при аргонодуговой сварке титановых сплавов // Свароч. пр-во.— 1974.— № 3.— С. 52—53.
191. *Симоник Г. А., Петвиашвили В. И., Иванов А. А.* Эффект контракции дугового разряда для введения электроотрицательных элементов // Там же.— 1976.— № 3.— С. 49—51.
192. *Справочник* химика.— М. ; Л. : Химия, 1964.— Т. 3.— 1005 с.
193. *Суптель А. М.* Сварочная порошковая проволока // Автомат. сварка.— 1964.— № 6.— С. 91.
194. *Сурджан И., Лелуцю И., Беня Ф., Софроня В.* Оценка сварочно-технологических свойств покрытых электродов при помощи модульной электронной системы // Информ. материалы СЭВ.— Киев, 1984.— Вып. 1.— С. 55—58.
195. *Сучильников С. И., Агеев П. Я.* Исследование термоэлектронных свойств сталеплавильных шлаков // Физико-химические основы производства стали.— М., 1957.— С. 453—463.
196. *Термоэмиссионные* преобразования энергии: Сб. материалов симпоз.— М., 1965.— Т. 2.
197. *Тиходеев Г. М.* Явление блуждающей (неустойчивой) сварочной дуги // Тр. Цент. ин-та металлов.— 1936.— № 19.— С. 22—26.
198. *Тиходеев Г. Н.* Энергетические свойства электрической сварочной дуги.— Л. : Изд-во АН СССР, 1961.— 254 с.
199. *Торопов Н. А., Гинстлинг А. М., Лугинина И. Л.* О кинетике образования двухкальциевого силиката // ДАН СССР.— 1952.— № 2.— С. 10—16.
200. *Троицкий В. А.* Влияние индуктивности на форму кривой переменного тока сварочной дуги // Автомат. сварка.— 1974.— № 1.— С. 8—11.
201. *Уэлш А.* Реакции между твердыми телами // Химия твердого состояния.— М., 1961.— С. 390—407.
202. *Физические* основы термоэмиссионного преобразования энергии / Под ред. И. П. Стаханова.— М. : Атомиздат, 1973.— 364 с.
203. *Финкельнбург В., Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма.— М. : Изд-во иностр. лит., 1961.— 370 с.
204. *Фролов В. В.* Физико-химические процессы в сварочной дуге.— М. : Машгиз, 1954.— 129 с.
205. *Фрумин И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка.— Харьков : Металлургиздат, 1961.— 421 с.
206. *Фрумин И. И.* Предупреждение пор при сварке и наплавке под флюсом // Автомат. сварка.— 1956.— № 6.— С. 1—30.
207. *Фрумин И. И., Кирдо И. В., Подгаецкий В. В.* Образование пор в сварных швах и влияние состава флюса на склонность к порам // Автоген. дело.— 1949.— № 10.— С. 1—11.
208. *Хауффе К.* Изучение окисления металла как средство исследования ионов в твердых телах // Кинетика высокотемпературных процессов.— М., 1965.— С. 10—17.
209. *Хренов К. К.* Электрическая сварочная дуга.— М. ; Киев : Машгиз, 1949.— 204 с.
210. *Хренов К. К.* Об одном уточнении уравнения Сага // Свароч. пр.-во.— 1961.— № 9.— С. 1—4.
211. *Хренов К. К.* Еще об уточнении уравнения Сага // Там же.— 1962.— № 6.— С. 1—2.
212. *Хренов К. К., Кушнерев Д. М.* Керамические флюсы для автоматической дуговой сварки.— Киев : Гостехиздат УССР. 1954.— 107 с.
213. *Черноусов В. А., Волченко В. Н., Алешин Н. П.* Об оценке квалификации сварщиков, работающих в монтажных условиях ручным дуговым способом // Свароч. пр-во.— 1979.— № 11.— С. 33—34.
214. *Чуфаров Г. И. и др.* О термодинамике процессов окисления металлов // Механизм взаимодействия металлов с газами.— М., 1964.— С. 22—24.
215. *Шафранский Л. Г., Абрашин А. В.* Деионизирующее влияние плавикового шпата при сварке электродами с покрытиями фтористо-кальциевого типа // Свароч. пр-во.— 1974.— № 12.— С. 12.
216. *Швердтфегер К., Кляйн К.* Скорость улетучивания фтора из фторсодержащих жидких шлаков // Электрошлаковый переплав.— 1975.— Вып. 3.— С. 101—110.
217. *Шейнкин М. З., Панибратец Б. К., Зубов Н. А.* Средства оперативного измерения параметров процесса сварки с частыми короткими замыканиями дугового промежутка // Свароч. пр-во.— 1975.— № 3.— С. 47—48.
218. *Шельгаве М.* Математическая модель переходных процессов в сварочной дуге и ее исследование // Автомат. сварка.— 1971.— № 7.— С. 13—16.
219. *Шишаков И. А., Андреев В. В., Андрущенко Н. К.* Строение и механизм образования окисных пленок на металлах.— М. : Изд-во АН СССР, 1959.— 123 с.
220. *Шлепаков В. Н., Супрун С. А., Котельчук А. С.* Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой // Информ. материалы СЭВ.— Киев, 1986.— № 1.— С. 19—28.
221. *Шумкин В. Н.* К вопросу о порядке средней температуры стекающего в шов металла // Тр. ДВПИ им. Куйбышева.— 1940.— Вып. 22.— С. 48—53.
222. *Эллист Д. Ф., Глейзер М., Рамакришна В.*

Термохимия сталеплавильных процессов.— М. : Металлургия, 1969.— 252 с.
223. *Явдошин И. Р., Булат А. В., Швачко В. И.* Влияние технологических и металлургических факторов на гигиенические показатели электродов с рутиловым и ильменитовым покрытиями // Тр. Всесоюз. конф. по сварок. материалам, Орел, сент. 1979. г.— Киев, 1982.— С. 45—53.
224. *Явойский В. И.* Теория процессов производства стали.— М. : Металлургия, 1967.— 792 с.
225. *Якобашвили С. Б.* Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков.— Киев : Техніка, 1970.— 208 с.
226. *Ясько О. И.* Электрическая дуга в плазмотроне.— Минск : Наука и техніка, 1977.— 152 с.
227. *Amson G. C.* An Analyses of the Gas — Shielded Consumable Metal Arc Welding System // Brit. Weld. J.— 1962.— N 4.— P. 232—249.
228. *Baach H., Boeshard U., Bertelase B.* Möglichkeiten zur Beeinflussung des Schweissverfahrens durch neue Erkenntnisse bei der Unhüllung von Stabelectroden // Oerlikon Schweissmitt.— 1981.— N 95.— S. 11—15.
229. *Blue G. D., Green G. W., Bautista R. G., Margrave J. L.* The sublimation pressure of calcium (II) fluoride and the dissociation energy of calcium (I) fluoride // J. Phys. Chem.— 1963.— **67**, N 4.— P. 877—883.
230. *Blomguist A.* Hot Start — the Key to Successful SMA Welding with Ceramic Backing // Weld. J.— 1981.— N 7.— P. 17—22.
231. *Brink G. O.* Ionization of Alkali Atoms by electron bombardment // Phys. Rev.— 1962.— **127.**— P. 1204—1206.
232. *Bobrowski S.* O przenoszeni metali w luku electrod otulonych // Przeglad spwalnitstwa.— 1974.— N 10.— S. 257—258.
233. *Conn W. M.* Die Technische Physik der Lichtbogenschweissung, einschliesslich der Schweissmittel.— Berlin etc. : Springer, 1959.— 386 s.
234. *Cooksey C. G., Milner D. R.* Metal Transfer in Gas — Shielded Arc Welding // Physics of the welding arc : Sympos.— London, 1966.
235. *Criteria* for classification of MMA welding electrodes ragarding fume // IIW Doc. II-E-256—78.
236. *Critical* Fume Concentration // IIW Doc. II-820—77.
237. *De Vize L. F.* Metal transfer in Gas-Shielded Welding Arc // Physics of the welding arc : Sympos.— London, 1966.
238. *Doan G. E., Lorentz R. E.* Crater Formation and the Force of the Electric Welding Arc in Various Atmospheres // Weld. J.— 1941.— N 2.— P. 103-s — 109-s.
239. *Dorn L., Rippl P.* Prozessanalyse bein Metallichtbogen Schweissen-Beurteilung des Statischen und dynamischen Verhalten von Schweissgleichrichtern fur das Lichtbogenhandschweissen // Schweiss. und Schneid.— 1983.— N 12.— S. 601—606.
240. *Ecker G., Müller K.* Electron emission from the arc cathode under the influence of the individual field component // J. Appl. Phys.— 1959.— N 30.— P. 1466—1467.
241. *Eichorn F., Trösken F., Oldenburg T.* Untersuchung der Entstehung gesundheitsgefährdender Schweissrauche beim Lichtbogenhandschweissen und Schutzgasschweissen : Forschungs-berichte, Humanisierung des Arbeitslebens der Schweisser.— 1980.— B2.— S. 84.
242. *Erdmann-Jesnitzer F.* Beitrag Zur Physikalischen gesetzmässigkeit bei Elektronschweissverfahren und Nutzung magnetischer Felder // Schweisstechnik (DDR).— 1967.— N 5.— S. 53—56; N 6.— S. 66—69.
243. *Erdmann-Jesnitzer F.* Beitrag zur Wärmebilanz von Lichtbogenelektroden und zum Tiefbrand von zellulosonumhüllten Elektroden // Schweisstechnik (Wien). — 1956.— N 1/3.— S. 40—52.
244. *Erdmann-Jesnitzer F., Feustel E., Rehfeldt D.* Impulszählgerät zur Tropfenanalyse beim Lichbogenschweissen // Schweiss. und Schneid.— 1966.— N 5.— S. 226—229.
245. *Erdmann-Jesnitzer F., Rehfeldt D.* Elektronische Analysen Verfahren zur Untersuchung des Materialüberganges bei Elektroschweissverfahren // Techn. Mitteilungen.— 1970.— N 11.— S. 566—573.
246. *Erdmann-Jesnitzer F., Rehfeldt D., Kroker H.* Ursachen unterschieldlicher Abschemelzcharakteristik umhüllter stabelektroden // Schweisstechnik (DDR).— 1972.— N 8.— S. 169—175.
247. *Erdmann-Jesnitzer F., Rehfeldt D.* Messmetodik und Messtechnik zum Werkstoffübergang bei elektrischen Schmelzschweissverfahren.— Teil I. Der Analysator Hannover, ein Digitalrechner zur Analyse des Werkstoffuberganges // Schweiss. und Schneid.— 1968.— N 4.— S. 163—168.
248. *Erdmann-Jesnitzer F., Weinschenk H.-E.* Beitrag Zur Veränderung des Abschwmalzcharakter von ummaltenten Elektroden durch den elektronischen Anschlusskreis // Ibid.— 1959.— N 12.— S. 449—454.
249. *Fasiska E., Wagenblast H., Nasta M.* Characterization of arc welding fume. Mellon Institute MCC, Pittsburg, PA 15213, February, 1983 // Prepared for Safety and Health Committee America Welding Society, 550 N. W. Lejeune Road Miami, FL 33126.— P. 1—55.
250. *Gordon G. M., Cotter O. A., Parker E. R.* Effect of current and atmospheres on arc temperatures // Weld. J.— 1956.— N 2.— P. 109—112.
251. *Green W G.* An Analysis of Transfer in Gas-Schielded Welding Arcs // Appl. and Ind.— 1960.— N 49.— P. 194—203.
252. *Hantzsche E.* Theory of cathode spot phenomena // Physica B + C.— 1981.— **104**, N 1/2.— P. 3—16.
253. *Hantzsche E.* Unipolarbögen // Beitr. Plasmaphys.— 1980.— **20**, N 5.— S. 329—342.
254. *Heile R. F., Hill D. C.* Particulate fume generation in arc welding processes // Weld. J.— 1975.— N 7.— P. 201s—210s.

255. *Heiple C. R., Roper G. R.* Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry // Weld. J.— 1982.— N 4.— P. 97s—102s.
256. *Hirschfeld G., Weinschenk H.-E.* Spektrographische temperatur bestimmung on Schweisslichtbogen // Schweisstechnik (DDR).— 1960.— **10,** N 12.— S. 438—447.
257. *Howden D.* Mass transfer of metal vapour and anod temperatures in arc welding // Weld. J.— 1966.— N 3.— P. 125—132.
258. *Hummitzsch W., Zollenkopf H.* Die elektrische Leitfähigkeit der Umhüllungen und Schlaken von Schweisselektroden // Schweiss. und Schneid.— 1964.— N 2.— S. 45—50.
259. *Ishizaki K., Oishi A., Kumagai R.* A method of evaluating metal transfer characteristics of welding electrodes // Phys. the welding Arc: Sympos.— London, 1966.— P. 148—155.
260. *Ishizaki K., Oishi A., Kumagai R.* On the Metal Transferring Characteristics of Welding Electrode // J. Jap. Weld. Soc.— 1963.— N 3.— P. 187—191.
261. *Jelmorini J., Tichelaar G. W., Van den Heuvel G.* J. P. M. Droplet temperature measurements in arc welding // IIW-document.— 1977.— N 212—411.
262. *Jenkins N., Met A., Moreton J. et al.* // Welding Fume, vol. 1. Published by the Welding Inst., Abington Hall Abington.— Cambridge CB16AL, 1981.— 219 p.
263. *Jenkins N., Met A., Moreton J. et al.* Welding Fume, vol. 2. Published by the Welding Inst., Abington Hall Abington.— Cambridge CB16AL, 1981.— P. 211—506.
264. *Jüttner B.* Erosion craters and arc cathode spots in vacuum // Beitr. Plasmaphys.— 1979.— **19,** N 1.— P. 25—48.
265. *Keen B. J., Mills K. C., Bryant J. W., Hondors E. D.* Effect of interaction between surface active elements on the surface tension of iron // Can. Met. Quart.— 1982.— N 4.— P. 393—403.
266. *Keyte J. B.* Influence of the power characteristics under the direct current welding // Weld. J.— 1951.— **30,** N 12.— P. 1079—1083.
267. *Kimura Y., Ichihara I., Kobayashi M.* Some quantitative evaluation of fumes generated from coated arc electrodes // IIW Doc. II-701—74.— P. 17.
268. *Kimura S., Kobayashi M., Godai T., Minato S.* Investigation on Chromium in Stainless Steel Welding Fumes // IIW Doc. II-E-286—79.
269. *Kobayashi M., Maki S., Hashimoto Y., Suga T.* Some considerations about the formation mechanisms of welding fume // Weld. World.— 1978.— **16,** N 11/12.— P. 238—245.
270. *Kobayashi M., Maki S., Ohe I.* Factors affecting the amount of fumes generated by manual metal arc welding // IIW Doc. II-E-211—76.— P. 22.
271. *Koves A.* Analysis of CO_2 welding process of thin plates // IIS/IIW Doc. XII-909—85.— P. 11.
272. *Kubono T.* The evaporation rate from a single cathode spot on precious metal electrodes in vacuum arcs // J. Appl. Phys.— 1979.— **50,** N 12.— P. 7958—7964.
273. *Lancaster J. E.* Influence of Heat flow on Metal Transfer in Metal Transfer in Metal Inert Gas Welding of Aluminium // Physics of the Welding Arc : Sympos.— London, 1966.— P. 126.
274. *Langmuir I.* The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths // Phys. Rev.— 1929.— **33,** N 6.— P. 954—957.
275. *Lee T. H., Greenwood A.* Theory for the cathode mechanism in metal vapour arcs // J. Appl. Phys.— 1961.— **32,** N 5.— P. 916—923.
276. *Lesnewich A.* Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal — Arc Welding. Part 1 // Weld. Research Supplement.— 1958.— N 8.— P. 343s—353s; Part 2 // Ibid.— 1958.— N 9.— P. 418s—425s.
277. *Lesnewich A.* Electrode activation for inert — gas — shielded metal arc welding // Weld. J.— 1955.— **34,** N 12.— P. 1167—1178.
278. *Lucas W.* Computers in arc Welding : The next industrial revolution. Part 3 : Instrumentation and process analysis // Met. Constr.— 1985.— N 7.— P. 431—436.
279. *Mackeowen S. S.* The cathode drop in an electric arc // Phys. Rev.— 1929.— **34,** N 4.— P. 611—614.
280. *Magnusson E. J., Rosendahl C. H.* Studies of the possibilities of classifying welding electrodes according to fume generation. IIW Colloqium on «Welding and Health» // IIW Doc. II-E-301—80.
281. *Mathias D. L.* Recent Development on Contact Electrodes // Weld. J.— 1955.— N 4. S. 316—328.
282. *McMaster R. C., Martin D. C., Leatherman A.* Analysing Metal Transfer in Arc Welding // Weld. J.— 1949.— N 12.— P. 575s—583s.
283. *Mijasaka K., Oshiba F., Akamatsu T.* Effect of Eccentrisity of the Coating upon the Deposition of Weld Metal // J. Jap. Weld. Soc.— 1982.— N 7.— P. 47—55.
284. *Moreton J.* Welding Fume / Welding Inst., Abington Hall Abington Cambridge CB16AL, 1983.— Vol. 3.— 113 p.
285. *Morita N., Tanigaki T.* Investigation on welding fumes from covered electrode and development of low fume electrodes // IIW Doc. II-818—77.
286. *Müller A., Green W. G., Rothschild G. R.* Characteristics of Inert-Gas-Shielded Metal-Arcs // Weld. J.— 1951.— N 8.— P. 717—727.
287. *Needham J. C.* New-generation meters track weld parameters // Weld. Des. and Fabr.— 1980.— N 10.— P. 70—74.
288. *Nürnburg A. W., Bauder U. H., Mooser C., Behrisch R.* Cathode erosion in vacuum arcs

and unipolar arcs // Beitr. Plasmaphys.— 1981.— **21**, N 2.— P. 127—134.
289. *Orszach P., Senčak V.* System prestatisticku analyzu oblukoveho zvaracieho procesu // Zvaranie.— 1987.— N 3.— C. 69—72.
290. *Ozawa M., Morita T.* The measurement of Heat Quantity in Melted Metals // J. Jap. Weld. Soc.— 1963.— **32**, N 2.— P. 130—137.
291. *Patchett B. M.* Some influences of slag composition on heat transfer and arc stability // Weld. J.— 1974.— N 5.— P. 203—210.
292. *Pintard J.* Contribution à'lètude du transfer de metal dans le soudage MIG // Soudage et techn. connexes.— 1965. — N 7/8.— S. 278—287.
293. *Pochodnja I. K., Gorpenjuk V. N., Ponomarjov V. E. u. a.* Einfluss der Umhüllungszusammensetzung auf das Schweissverhalten von basischen Elektroden // Schweisstechnik (DDR).— 1981.— N 9.— S. 410—412.
294. *Pokhodnya I. K., Ponomarev V. E., Gorpenyuk V. N.* Technological properties of basic electrodes and methods of their measuring // IIW Doc. XII-1040—87.
295—296. *Rehfeldt D., Erdmann-Jesnitzer F.* Untersuchungen zum Materialübergang beim Metall-Schutzgasschweissen // Metall.— 1971.— N 12.— S. 1367—1370.
297. *Rehfeldt D.* Proze simulation zur dynamischen Prufung von Schwei stromquellem // Schweiss. und Schneid.— 1979.— N 5.— S. 208—210.
298. *Rehfeldt D., Seyferih I.* Application of Microprocessors for Analysing and Monitoring Arc Welding Processes // 9th conf. on weld., 28—30 March 1984. Budapest (Hungary).— P. 275—286.
299. *Rehfeldt D.* Untersuchungen zum Materialübergang beim Metall — Schutzgasschweissen // Metall.— 1971.— N 4.— S. 369—374.
300. *Renelt E.* Kohlendioxid-Argon-Gasgemische zum Schutzgasschweissen // ZIS-Mitt.— 1966.— N 10.— S. 1395—1409.
301. *Researches* on the origin and the characteristics of chromium in stainless steel welding fumes // Jap. Wel. Eng. Soc.— IIW Doc. II-A-563—82.
302. *Rössler K.* Der Einfluss der Stromquallencharakteristik und der Schweissparameter auf den Werkstoffübergang, die Spritz und Abbrandverluste bei der Wasserdampfschweissung // ZIS-Mitt.— 1966.— N 2.— S. 1856—1864.
303. *Salageon T. S., Boarna C.* Asurvey of research on the dynamic behaviour of welding transformers // Weld. World.— 1970.— **8**, N 3.— P. 154—158.
304. *Schellhase M.* A study of statistical average for CO_2 welding process monitoring // IIS/IIW.— Doc. 212-539.—82.— 10 p.
305. *Schellhase M.* Investigations into arc welding process monitoring by statistical signal analysis // IIS/IIW.— Doc. 212-497—81.— 10 p.
306. *Slepian J.* Theory of Current transference at the cathode of an arc // Phys. Rev.— 1926.— **27**.— P. 10.
307. *Staudte H.-G.* Elektronischez Zählgerat zur Tropfenanalyse beim Lichtbogenschweissen // ZIS—Mitt.— 1967.— N 1.— S. 46—53.
308. *Stromberger C., Elbeck J.* Vergleichsergebuise Zwischen Klassierenden Zählen der spannungseinbrüche und Subjektiven Beobachten beim Lichtbogenschweissen // Schweiss. und Schneid.— 1968.— N 10.— S. 503—508.
309. *Stromberger C., Spahn C.* Gebrauch des Computers bei der Entwicklung von umhüllten Stabelektroden // Werkstatt und Betr.— 1972.— N 2.— S. 93—97, 107.
310. *Studies* Concerning the Fume Classification of Covered Electrodes // IIW Doc. II-956—81; VIII-10001—82.
311. *Suga T., Kobayashi M.* Fume Generation in CO_2 Arc Welding by Flux-Cored Wire. Quarterly // J. Jap. Soc.— 1984.— N 4.— P. 68—75.
312. *Swedish* Standart SS 062801 «Welding Electrodes — Covered Electrodes Fume Class» // IIW Doc. II-E-285A—79.
313. *Swedish* Standart SS 062802 «Welding Electrodes — Fume Classes Threshold Limit Values» // IIW Doc. II-E-285B—79.
314. *Tsuboi J., Sasaki H.* Interruption Mechanism of the Covered Electrode-Arc // Trans. Jap. Weld. Soc — 1971.— **2**, N 2.— P. 62—69.
315. *Van Bemst A., Delporte R., Willi A.* Beitrag zum Studium der Schweissranche und zur Bestimmung gesunder Arbeitsbedingungen // Oerlikon Schweissmitteilungem.— 1973.— **32**, N 6.— S. 1—22.
316. *Waszhink J. H., Piena M. J.* Thermal Processes in Covered Electrodes // Weld. J.— 1985.— N 5.— P. 37s—48s.
317. *Waszhink J. H., Van den Henvel G. J. P. M.* Measurement and calculations of the resistance of the wire extension in arc welding // Int. Conf. on arc phys. and weld pool behaviour.— London, 1979.— P. 227—239.
318. *Weinschenk H.-E., Müller W* Messmetoden zur Unter-Suchung des Werkstoffüberangles im Schweisslichtbogen // Schweisstechnik (DDR).— 1968.— N 11.— S. 505—509.
319. *Weinschenk H. E., Schellhasse M.* Messungen der Bogenbrennstabilität von Schutzgasschweisslichtbögen an abschmelzender Electrode // Ibid.— 1973.— N 6.— P. 264—268.
320. *Welis A. A.* A Momentum Principle for Arc Force // Brit Weld. J.— 1962.— N 4.— P. 227—231
321. *Wyant R. A., Winsor L. P., McDonald.* An Investigation of Method for Evaluating Welding-Arc Stability and their Application / Weld. and Res. Suppl.— 1948.— N 10.— P. 502s—514s.
322. *Yoshida T., Abe T., Onoue H.* Transferring Phenomena of Coated Welding Electrode // Weld Farb. and Des.— 1962.— N 12.— P. 10—11.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Основные условные обозначения 4

Глава первая

Особенности сварочных дуг 5

1. Характеристики сварочных дуг 5
2. Температура сварочной дуги . . . 9
3. Механизм приэлектродных процессов 11
4. Термоэлектронная эмиссия шлаков 16
5. Положительная термоионная эмиссия шлаков 26
6. Эффективность образования положительных ионов при термической и поверхностной ионизации 30
7. Отрицательные ионы в дуге 34
8. Отрицательные ионы в контрагировании столба дугового разряда 43

Глава вторая

Стабильность сварочной дуги 49

1. Методы и критерии оценки 49
2. Аппаратура для измерений электрических и временных параметров 63
3. Влияние составляющих покрытия на стабильность дуги 68
4. Повторное зажигание дуги и эмиссионные свойства шлаков 79
5. Влияние конструкции и толщины покрытия на стабильность дуги . . . 82
6. Влияние типа и состава связующего на стабильность дуги 84
7. Зависимость процесса повторного зажигания дуги от состояния межэлектродного промежутка 86

Глава третья

Физико-химические процессы при нагреве электродов 93

1. Распространение тепла 93
2. Температура капель электродного металла 101
3. Процессы в твердой фазе 107
4. Испарение электродного материала и образование сварочного аэрозоля 134
5. Испарение металлического и шлакового расплавов и образование сварочного аэрозоля 128
6. Взаимосвязь валовых выделений, химического состава сварочного аэрозоля и условий сварки 134
7. Взаимосвязь валовых выделений, химического состава сварочного аэрозоля и составляющих покрытия 137
8. Санитарно-гигиеническая оценка электродов 146

Глава четвертая

Плавление и перенос электродного металла 153

1. Кинетика плавления покрытых электродов 153
2. Силы, действующие на каплю электродного металла 158
3. Перенос электродного металла . . . 163
4. Методы исследования и критерии оценки переноса электродного металла 168
5. Длительность коротких замыканий и характер переноса электродного металла 172
6. Результаты исследования переноса металла 177

Глава пятая

Характеристики источников питания и технологические свойства электродов 200

1. Применение «горячего» старта для улучшения начального зажигания электродов 200
2. Влияние импульсов тока, индуктивности и формы внешней характеристики источника питания на перенос металла 202
3. Характеристики сварочных трансформаторов и стабильность дуги . . . 204
4. Улучшение повторного зажигания дуги переменного тока с помощью импульсных стабилизаторов 208

Заключение 211

Список литературы 213

Научное издание

Походня Игорь Константинович
Горпенюк Валентин Николаевич
Миличенко Сергей Семенович
Пономарев Владимир Еремеевич
Стародубцев Леонид Васильевич
Швачко Валентин Иванович
Явдощин Игорь Романович

МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Процессы в дуге и плавление электродов

Оформление художника *И. М. Галушки*
Художественный редактор *И. П. Антонюк*
Технические редакторы *Г. Р. Боднер, В. А. Краснова*
Корректоры *С. И. Кримец, А. С. Улезко, Л. Н. Регета*

ИБ № 9674

Сдано в набор 11.09.89. Подп. в печ. 06.03.90. БФ 02032. Формат 70×100/16. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Выс. печ. Усл. печ. л. 18,2. Усл. кр.-отт. 18,93. Уч.-изд. л. 19,93. Тираж 1 500 . экз. Зак. № 9—3165. Цена 4р. 40к.

Издательство «Наукова думка».
252601, Киев 4, ул. Репина, 3.

Головное предприятие республиканского производственного объединения «Полиграфкнига». 252057, Киев, ул. Довженко, 3.