

УДК 533.9...15

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ В МОЩНЫХ ОДНОКАМЕРНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

© 2021 г. А. А. Сафронов¹, В. Е. Кузнецов¹, Ю. Д. Дудник^{1, *}, В. Н. Ширяев¹,
О. Б. Васильева¹, В. Б. Ковшечников¹

¹ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Поступила в редакцию 02.07.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Рассматриваются два типа плазмотронов переменного тока разной мощности, принципиально различающиеся конструкцией электродов, работающие с такими плазмообразующими газами, как воздух, азот, углекислый газ, метан, водород, гелий и др., и имеющие различное применение. Работа посвящена экспериментальным исследованиям процессов эрозии материала электродов плазмотронов, предназначенных для нагрева различных газов (воздух, азот и др.) при давлении до 8 МПа до среднемассовых температур 6000 К с тепловым КПД 60–85%.

DOI: 10.31857/S004036442103011X

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных аспектов, определяющих рабочие характеристики и надежность работы плазмотрона, является конструкция электрода. Электродная система испытывает значительные термические нагрузки, электроэрозионное воздействие, влияние коррозии со стороны элементов плазмообразующего газа, и прежде всего кислорода. Эрозионный износ материала электродов определяется мощностью плазмотрона (величиной рабочего тока), режимом работы электрода (анод или катод), свойствами плазмообразующего газа и составом материала электрода [1].

Тепловой поток электрической дуги в точке привязки на поверхности электрода приводит к плавлению материала, возникновению “ванны” расплава, при этом некоторая его часть может быть унесена с поверхности под воздействием газодинамических и электромагнитных сил. При перемещении опорного пятна дуги на поверхности электродов возможно появление кратеров и их комплексов, появление и развитие трещин и отколов, как следствие термических и усталостных напряжений. В зоне непосредственного воздействия электрической дуги на поверхность электрода возможны локальный нагрев до температуры 15000–20000°C и появление локальных напряжений до 1000 МПа [1, 2]. В случае остановки или уменьшения скорости движения точки привязки по поверхности электрода процесс эрозии становится интенсивнее.

Отличительной особенностью работы электродов плазмотрона переменного тока является

периодическая смена полярности, приводящая к изменению механизма взаимодействия их поверхности с дугой, а также изменение тока и, соответственно, наличие переменной составляющей теплового потока в электрод.

Анализ механизма работы материалов электродов в условиях повышенной температуры показывает, что ресурс работы может быть увеличен за счет введения определенных добавок, снижающих интенсивность разрушения основного материала электрода в процессе создания плазмы, и (или) максимально равномерного распределения теплового потока по поверхности электрода.

В настоящей статье рассмотрены два типа электродной системы мощных плазмотронов переменного тока, где электрод в некотором приближении можно представить в виде цилиндра с рабочей зоной на торце, либо расположенной вдоль образующей цилиндра.

Целью работы является исследование эрозии материалов и конструкций электродных блоков мощных однокамерных трехфазных плазмотронов переменного тока в зависимости от мощности, расхода и вида рабочего газа, в том числе для диапазона давлений, превышающих атмосферное. Для определения эрозии использовался гравиметрический метод: определялась потеря массы электрода его взвешиванием до и после эксперимента. В качестве характеристики эрозии была выбрана удельная эрозия – потеря массы электрода при протекании единичного заряда через электрод.

ТРЕХФАЗНЫЙ ПЛАЗМОТРОН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Конструктивно трехфазные плазмотроны состоят из следующих основных узлов: дуговой камеры, камеры тангенциальной закрутки подачи рабочего газа, электродного блока с электроизоляционной высокотемпературной вставкой и корпуса. Электродуговая камера трехфазного однокамерного плазмотрона со стержневыми электродами состоит из цилиндрического и сужающегося конического участков [3, 4]. В цилиндрическом участке камеры три стержневых электрода располагаются параллельно ее оси. В стенках этого участка выполнен ряд отверстий, через которые в электродуговую камеру тангенциально либо под определенным углом поступает рабочий газ.

Плазмотрон предназначен для работы на инертных газах, азоте и водороде и рассчитан на стационарный режим работы. Дуговая камера плазмотрона и электроды охлаждаются водой. Дуговая камера и корпус плазмотрона выполнены как единое целое из нержавеющей стали, имеют рубашку охлаждения, в которой расположены спиральные направляющие, организующие поток охлаждающей жидкости. Подвод охлаждающей жидкости производится в наиболее термически напряженный участок дуговой камеры, т.е. на ее срез. Компенсация термических напряжений, возникающих за счет нагрева электродуговой камеры, осуществляется гофрой, выполненной по типу сильфонной и расположенной на охлаждающей рубашке.

Принцип работы плазмотрона заключается в следующем: между торцами стержневых электродов горят дуги переменного тока, сдвинутые по фазе, величина сдвига может быть различной и определяется условиями горения дуги в электродуговой камере. Поступающий через отверстия тангенциальный поток рабочего газа образует у стенок электродуговой камеры относительно холодный слой, частично защищающий их от конвективного теплового потока. Кроме того, в зоне холодного слоя концентрация заряженных частиц резко падает, создается изолирующая область, вследствие чего столб дуги не касается стенок.

Для получения высокого теплового КПД форма камеры выбрана близкой к шарообразной: отношение длины камеры к ее среднему диаметру во всех конкретных моделях близко к единице. Существенно облегчает согласование работы плазмотрона с системой его электропитания параллельное расположение электродов, которое обеспечивает при некотором изменении длины электродов, возникающем из-за уноса электродного материала при эксплуатации, сохранение неизменными межэлектродного расстояния и, как следствие, внешних характеристик плазмотрона.

Объединение в одну камеру всех трех фаз обеспечивает постоянное горение в камере “дежурной” дуги, а вместе с ней и достаточное количество носителей зарядов (n_e) для повторного зажигания дуги между парами электродов без заметных пиков напряжения при смене полярности напряжения.

КОНСТРУКЦИИ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве рабочего материала для изготовления электродов использован вольфрам с присадками. В режиме катода присадки снижают работу выхода электронов, т.е. режим термоэмиссии наступает при более низкой температуре рабочей поверхности, а в режиме анода тугоплавкий вольфрам обеспечивает наибольшую термостойкость электрода. В экспериментах использовался вольфрам с добавками оксидов редкоземельных элементов, но необходимо заметить, что при температурах, превышающих 3200 К, оксидные соединения разрушаются и эмитировать начинает вольфрам (работа выхода для вольфрама – 4.52 эВ, для вольфрама с добавками оксида лантана(III) – около 2.6 эВ).

Длина электродов обусловлена размером камеры, необходимостью обеспечить расстояние между дугой и электроизоляционной шайбой, предотвращающее ее повреждение и разрушение. Для эффективного отвода теплового потока от рабочей поверхности электрода вода должна как можно ближе подходить к этой поверхности. Технически удается подвести воду до места крепления вольфрамовых стержней в электрододержатель. При работе на давлениях 0.1–0.5 МПа и токах до 1 кА этого оказывается достаточно для поддержания температуры поверхностных слоев электрода ниже температуры плавления, что обеспечивает термоэмиссионный режим его работы без оплавления поверхности и механического разрушения.

При возрастании тока и увеличении давления в камере плазмотрона до 1–5 МПа значительно возрастает омический тепловой нагрев электродов в зоне электродных пятен, а также лучистый тепловой поток из плазмы, и такая конструкция электрода не обеспечивает отвод избыточного тепла. Электроды начинают интенсивно разогреваться с образованием жидкой фазы и выносом расплава в электродуговую камеру и далее с потоком нагретого газа. Вольфрамовые стержни выпадают из электрододержателей, и электрод разрушается. Кроме того, значительно возрастает концентрация паров металла в дуге, что приводит к снижению напряженности электрического поля и уменьшению энерговыклада. Для эффективного охлаждения электрода была разработана

конструкция электрода с комбинированными водяным и газовым охлаждениями.

Электрод состоит из цилиндрического медного охлаждаемого электрододержателя и наконечника. Типы наконечников:

стержень (вольфрам–рений) диаметром 40 мм и длиной 30 мм;

стержень (вольфрам–рений) диаметром 40 мм и длиной 30 мм с рядом отверстий диаметром 2–3 мм для продува газа (рис. 1);

сборка стержней из лантанированного и иттрированного вольфрама диаметром 10 мм и длиной 40 мм, запаянных в медную втулку с отверстиями для продува газа (рис. 2);

стержень из сплава вольфрам–никель–медь диаметром 40 мм и толщиной 30 мм;

сборка из вольфрамовой проволоки диаметром 1 и 2,5 мм, запрессованная в медную обойму с продувом газа через нее (рис. 3).

Газ подается через отверстия в вольфрамовом стержне, если наконечник в виде одного стержня, или между стержнями, если наконечник наборный. Как показали испытания, такое решение позволяет обеспечить работу электрода до давления 8 МПа при токе до 2 кА. При этом было обнаружено, что газовое охлаждение электрода примерно в 1,5 раза повышает напряжение на дуге и увеличивает мощность плазматрона. Столб дуги становится диффузным, а рабочая поверхность электрода изнашивается более равномерно, что, по-видимому, обусловлено дестабилизацией привязки электродного пятна на поверхности. Эксплуатационные величины разрушения материала электродов и соответствующего изменения характерного показателя удельного износа (грамм на кулон) для разных температурных и тепловых режимов приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, определяющим фактором, влияющим на износ стержневых вольфрамовых электродов, является величина тока и давление в камере плазматрона. Продув газа через электрод позволяет примерно на порядок уменьшить эрозию по сравнению с тем же режимом, но без продува.

ТРЕХФАЗНЫЙ ПЛАЗМОТРОН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С РЕЛЬСОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Плазмотрон с рельсовыми электродами состоит из следующих основных элементов: корпуса, выходного фланца с соплом, системы электродов и инжектора [5]. Корпус изготовлен из нержавеющей стали и представляет собой цилиндр, переходящий в усеченный конус. Охлаждение корпуса – водяное. Одним из достоинств многофазных однокамерных плазматронов с электродами рельсового типа является достаточно низкий уровень напряже-

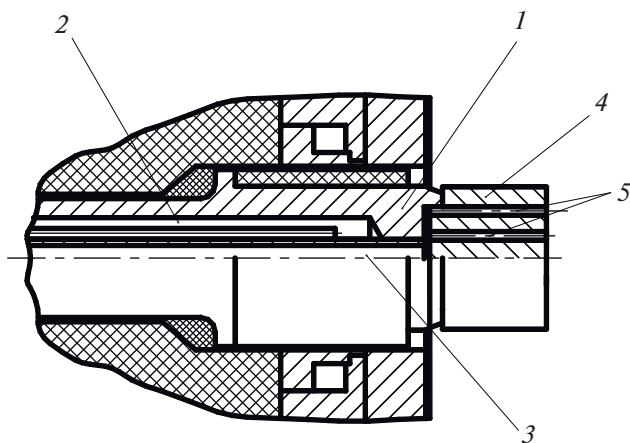


Рис. 1. Электрод с наконечником (вольфрам–рений) с рядом отверстий для продува газом: 1 – электрододержатель, 2 – рубашка охлаждения, 3 – канал для подачи газа, 4 – наконечник, 5 – отверстия для продува газа.

ния на основных электродах. Параметры питающей сети: напряжение – 380/480 В, частота – 50/60 Гц. Электроды в разрядной камере установлены с минимальным межэлектродным расстоянием от 8–2 мм. Чтобы обеспечить надежное зажигание дуги в межэлектродном промежутке при сравнительно низком напряжении питания, в состав плазматрона вводится однофазный высоковольтный плазмотрон в качестве инжектора носителей зарядов [6]. При работе инжектора в зоне минимального расстояния между основными электродами плазматрона устанавливается поток плазмы с концентрацией электронов $n_e = 10^{14}–10^{16} \text{ см}^{-3}$, достаточной для зажигания основных дуг. Иницированные дуги перемещаются по расходящимся электродам со скоростью 10–30 м/с, зависящей от тока, угла наклона электродов, а также расхода и способа подачи рабочего газа. Дуги заполняют большую часть разрядной камеры, со-

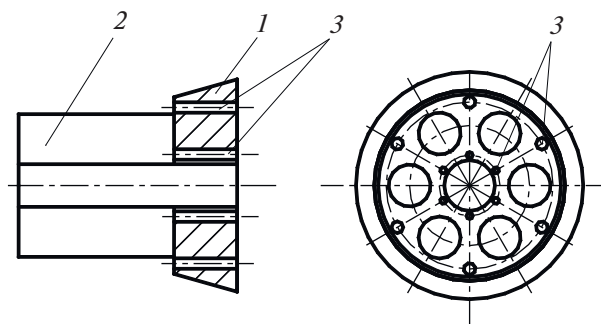


Рис. 2. Наконечник из лантанированного или иттрированного вольфрама с отверстиями для продува газа: 1 – втулка медная, 2 – стержень диаметром 10 мм, 3 – отверстия для продува газа.

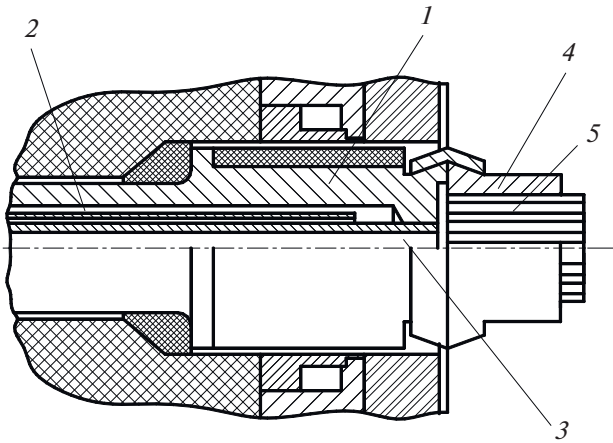


Рис. 3. Электрод с наконечником из вольфрамовой проволоки с продувом газа: 1 – электрододержатель, 2 – рубашка охлаждения, 3 – канал для подачи газа, 4 – обойма медная, 5 – стержни.

вершая движение в продольном и поперечном направлениях. Благодаря этому можно получить сравнительно большой тепловой КПД плазматрона (до 85%) [7]. В пристеночной зоне, куда подается холодный газ, создающий изолирующий слой, концентрация заряженных частиц резко падает и происходит погасание дуги. Описанный процесс непрерывно повторяется, в результате чего на выходе из сопла плазматрона образуется струя плазмы со среднemasсовой температурой порядка 1500–5500 К.

В основу работы плазматронов с электродами рельсового типа положен принцип электродина-

мического движения дуг в поле собственного тока (рельсотронный эффект). Быстрое перемещение точки привязки дуги по электроду под действием электродинамических и газодинамических сил распределяет тепловую нагрузку по длине электрода.

РЕЛЬСОВЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Электроды имеют изогнутую форму и могут быть выполнены из медного прутка диаметром 20–40 мм с внутренним отверстием для протекания охлаждающей жидкости (рис. 4). На каждом электроде есть два штуцера с резьбой, они позволяют зафиксировать положение электрода в разрядной камере плазматрона. Таким образом, установленный электрод имеет одну степень свободы для перемещения в радиальном направлении. Это позволяет быстро изменять межэлектродный зазор.

Поскольку эрозия электродов зависит как от мощности теплового источника, так и от длительности его приложения, то создание благоприятных условий для направленного перемещения опорных точек электрической дуги должно привести к снижению времени теплового воздействия и, соответственно, эрозии электродов.

В результате исследований скорости перемещения дуги [8] можно выделить наиболее важные параметры, влияющие на нее: расстояние между электродами, величину тока, состояние поверхности электродов, их материал, конструктивные особенности.

В ходе выполнения экспериментов были проведены исследования взаимосвязи следующих

Таблица 1. Эксплуатационные величины разрушения материала электродов

Материал электрода	Ток, кА	Давление, МПа	Расход, кг/с		Эрозия электрода, г/Кл
			общий	через электрод	
Вольфрам–рений, диаметр – 40 мм, W ~ 73%, Re ~ 27%	2–3	1.5–2.5	0.6–1		2×10^{-2}
Вольфрам, диаметр – 40 мм	2	2	0.6–1		10^{-2}
Вольфрам–никель–медь, диаметр – 40 мм, W ~ 80%, Ni+Cu ~ 20%	1	1	0.5		10^{-3}
Вольфрам–никель–медь, диаметр – 40 мм, с отверстиями, W ~ 80%, Ni+Cu ~ 20%	0.8	8	0.7	0.1	10^{-3}
Вольфрам иттрированный, диаметр – 10 мм, с продувом, W ~ 97.6%, Y ~ 2.3%	0.9	6	0.5	0.015	10^{-3}
Вольфрам, диаметр – 2.5 мм, с продувом	0.7	5	0.5	0.08	10^{-3}
Вольфрам лантанированный, W ~ 98.9%, La ~ 1.1%	1.0	0.1	0.05		10^{-3}
Вольфрам лантанированный, W ~ 98.9%, La ~ 1.1%	1.0	0.1	0.015		10^{-4}

параметров: длительности работы, величины тока, угла раскрытия электродов, материала и конструктивных особенностей электродов. Данные, полученные при различных режимах работы плазменной системы, представлены в табл. 2.

В экспериментах по определению удельной эрозии медных электродов в зависимости от тока, угла раскрытия, диаметра электродов и теплового потока в электроды рабочим газом был воздух. Время проведения экспериментов составляло от 2 до 40 ч. Полученные зависимости являются интегральными и не затрагивают роль микропроцессов на поверхности электродов. Как известно [9], эрозия электродов проходит в газовой, жидкой и твердой фазах. Причем до сих пор не ясен вопрос о соотношении долей каждой фазы. На рис. 5 представлены экспериментальные данные по эрозии медных электродов в зависимости от угла их раскрытия α , действующего значения тока дуги I , расхода плазмообразующего газа G и суммарных тепловых потерь в электроды Q .

Из рисунков видно, какой-либо зависимости удельной эрозии от перечисленных выше факторов не прослеживается. В инженерных расчетах приближенно можно считать, что удельная эрозия является величиной постоянной и с некоторой степенью запаса для данных плазмотронов составляет около 10^{-5} г/Кл, достигая такого значения за счет того, что тепловая нагрузка от опорных пятен дуги распределяется по рабочей поверхности электрода.

На рис. 6 приведены данные по удельной эрозии медных электродов плазмотронов постоянного и переменного тока, выполненные различными исследователями [9]. Эксперименты проводились на разных по конструкции плазмотронах, при разных токах разряда и расходах плазмообразующего газа. Так же, как и в нашем случае, можно считать, что удельная эрозия является приближенно постоянной величиной, но приводимые данные по эрозии на порядок меньше.

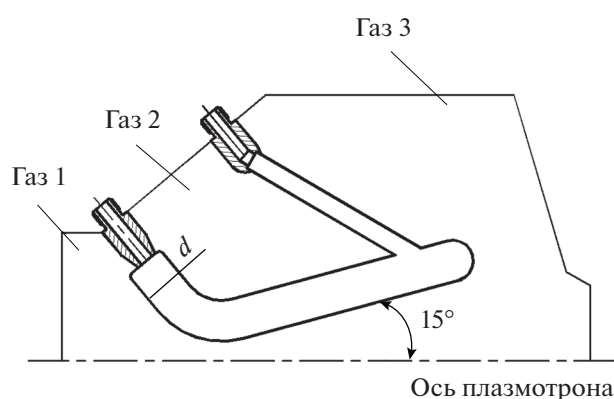


Рис. 4. Рельсовый электрод с углом раскрытия 15° : 1, 2, 3 – соответственно инжекторный, основной и сопловой вводы рабочего газа.

Следует отметить, что при использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха по мере образования слоя окалины (теплопроводность этого слоя ниже, чем у чистой меди) время, в течение которого пятно привязки дуги остается неподвижным, увеличивается; в силу этого вероятность образования каверн в металле возрастает, что увеличивает массу выносимого материала. На поверхности электрода появляются трещины, приводящие к прорыву жидкости из канала охлаждения электрода в электродуговую камеру плазмотрона (рис. 7). За время работы поверхность электродов в месте контакта с дугой становится неровной и приобретает форму сливающихся между собой полусфер диаметром 1–3 мм, на границах между которыми виден тонкий слой окислов меди.

Таким образом, в первом приближении расход материала электродов можно представить в виде

$$\varepsilon = kI,$$

где $k = 10^{-5}$ г/(А с).

Для теплового потока в электроды не удалось подобрать сколько-нибудь приемлемую зависи-

Таблица 2. Экспериментальные данные при различных режимах работы

Угол раскрытия электродов, град	Ток короткого замыкания, А	Средняя мощность, кВт	Суммарный расход рабочего газа, г/с	Среднее значение эрозии, г/Кл
75	700	180	28.7	4.3×10^{-6}
30	500	285	26.8	6.6×10^{-6}
30	700	298	34.8	7.7×10^{-6}
30	700	278	32.7	6.6×10^{-6}
30	700	228	34.8	3.7×10^{-6}
45	1000	299	24.9	4.1×10^{-6}
15	500	154	34.2	5.4×10^{-6}
15	500	140	37.8	4.8×10^{-6}

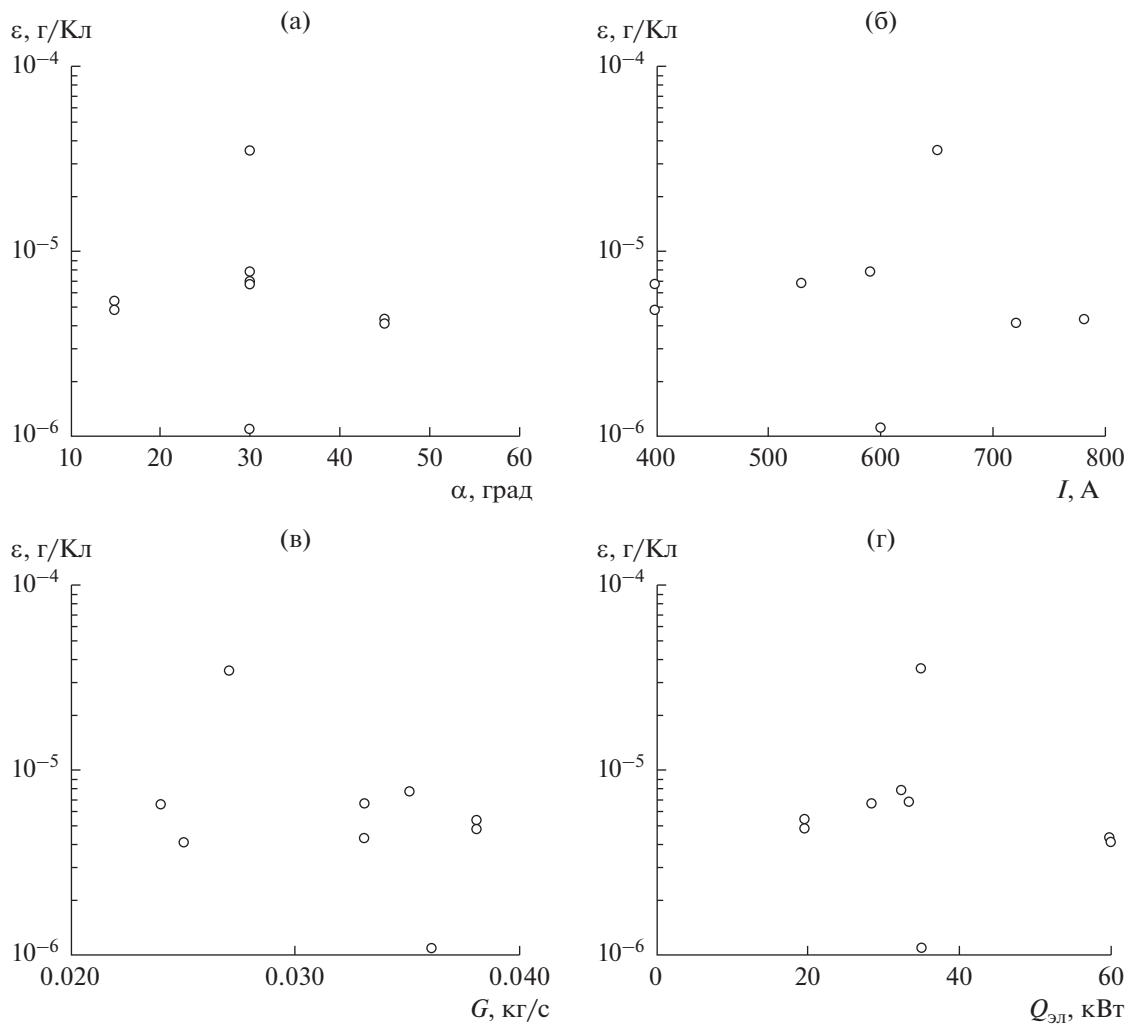


Рис. 5. Зависимость величины эрозии от угла раскрытия электродов (а), тока дуги (б), расхода плазмообразующего газа (в), суммарных тепловых потерь в электроды (г).

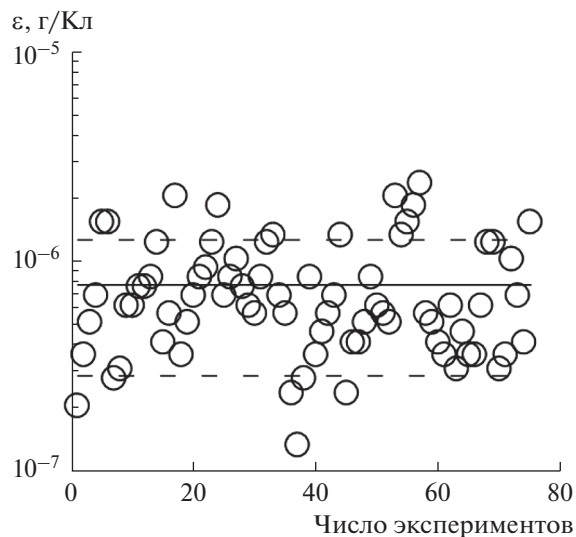


Рис. 6. Удельная эрозия плазмотронов постоянного и переменного тока [9].



Рис. 7. Поверхность электрода плазмотрона после нескольких часов работы.

мость. Теоретическое решение задачи теплообмена также пока не представляется возможным в связи со сложным характером течения вблизи электродов. Поэтому представляется целесообразным использовать эмпирические выражения. Тепловой поток в один электрод, отнесенный к мощности плазмотрона, можно записать как

$$\frac{Q_{эл}}{W_{пл}} = 0.024 + 3.76 \times 10^{-5} I + 0.24G - 7.6 \times 10^{-4} IG.$$

Данное соотношение, полученное в работе [10], было проверено для углов раскрытия, не превышающих 75°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод о том, что при работе плазмотрона материалы электродов подвергаются электрической эрозии, химической эрозии, и механическому износу. В ходе исследований опробованы различные конструкции электродных систем плазмотрона переменного тока высокой мощности с торцевыми и рельсовыми электродами, получены данные по удельному эрозионному износу использованных электродных материалов.

Для стержневых электродов, изготовленных из материалов на основе вольфрама, удельная эрозия изменялась от 10^{-2} до 10^{-4} г/К, максимальный износ зафиксирован при токе 2 кА и использовании азота в качестве рабочего газа. Это может быть связано с величиной тока и присутствием некоторого количества примесей кислорода в рабочем газе, так как использовался азот технической чистоты. Минимальный износ зафиксирован в экспериментах с гелием.

Для рельсовых медных электродов установлено, что минимальный уровень удельного износа составляет 3.7×10^{-6} г/Кл при рабочем токе порядка 700 А и угле раскрытия электродов 30°. При этом во всех экспериментах удельная эрозия составляла $\sim 10^{-6}$ г/Кл. Это достигалось вследствие равномерного распределения тепловой нагрузки по поверхности электрода, при этом выход из строя электрода происходил из-за механического разрушения (трещин до канала охлаждения), а не из-за полного износа материала.

Можно предположить, что при увеличении силы тока и преодолении некоторой, для каждой конструкции электрода своей, величины воспри-

нимаемого теплового потока в механизме разрушения электродов начинают интенсивно проявляться процессы, не связанные напрямую с эрозией, и фактор механического разрушения становится более значимым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов С.Е., Васильева О.Б., Кузнецов В.Е., Кузьмин К.А., Сафронов А.А., Овчинников Р.В., Шекалов В.И., Ширяев В.Н.* Исследование влияния субмикронных частиц хрома на свойства материалов электродов низкотемпературных плазмотронов из сплавов на основе меди // Вопросы материаловедения. 2010. № 4(64). С. 111.
2. *Хольм Р.* Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1991. 462 с.
3. *Сафронов А.А., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н.* Анализ высокочастотных процессов в электроразрядной камере трехфазного плазмотрона при высоком давлении рабочего газа // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 656.
4. *Сафронов А.А., Ковшечников В.Б., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н.* Исследование процессов теплообмена в трехфазном однокамерном плазмотроне с торцевыми электродами // ТВТ. 2019. Т. 57. № 6. С. 846.
5. *Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н.* Плазмотроны переменного тока. Системы иницирования дуги. Особенности конструкции и применения // ПТЭ. 2019. № 2. С. 58.
6. *Dudnik Yu.D., Borovskoy A.M., Shiryaev V.N., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Ivanov D.V.* Plasma Injector for a Three-phase Plasma Torch with Rail Electrodes and Some Results of Its Investigation // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946. № 1. P. 012167.
7. *Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Попов С.Д., Суров А.В., Наконечный Г.В.* Многофазные электродуговые плазмотроны переменного тока для плазменных технологий // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 205.
8. *Kuznetsov V.E., Safronov A.A., Shiryaev V.N., Vasilieva O.B., Pavlov A.V., Dudnik Y.D., Kuchina Y.A.* Application Field and Ways to Control ac Plasma Torch with Rail Electrodes // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946. № 1. P. 012166.
9. Теория термической электродуговой плазмы / Под ред. Жукова М.Ф. Ч. 2. Новосибирск: Наука, 1987. 286 с.
10. *Ковшечников В.Б., Антонов Г.Г., Уфимцев А.А.* Об эффективности нагрева газа трехфазным плазмотроном переменного тока со скользящими дугами // ИФЖ. 2007. Т. 80. № 6. С. 57.