

УДК 533.924

Способы увеличения ресурса электродов в дуговых плазмотронах*

А.С. Аньшаков^{1,2}, В.А. Фалеев¹, М.В. Чередниченко^{1,2}

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный технический университет*

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований эрозии электродов в сильноточных дуговых разрядах. Имеющиеся данные по ресурсу работы электродов в дуговых генераторах плазмы подчас противоречивы и не дают цельной картины по взаимосвязи удельной эрозии материала электрода с основными определяющими параметрами плазмотрона. Предложены реальные способы увеличения длительности эксплуатации плазмотронов до замены электродов.

Ключевые слова: дуговой разряд, плазмотрон, тепловые потоки, удельная эрозия электрода, вихревая стабилизация дуги, самовосстанавливающийся катод.

Ресурс непрерывной работы электродов дугового плазмотрона является определяющим параметром при реализации любого высокотемпературного технологического процесса. Вследствие этого отыскание способов снижения скорости разрушения (эрозии) материала электрода является весьма актуальной проблемой при создании технологических плазмотронов.

Ресурс электродов определяется электрофизическими, аэродинамическими и тепловыми процессами в приэлектродных областях дугового разряда, на поверхности электрода и внутри кристаллической решетки металла [1]. Поэтому пути решения проблемы стойкости электродов разнообразны и зависят от условий эксплуатации и технологического процесса, от силы тока, расхода, давления и рода газа в разрядной камере.

По современным представлениям эрозия электродов определяется тепловыми нагрузками в месте контакта опорного пятна дуги с поверхностью металла, а они непосредственно связаны с физическими процессами в приэлектродных областях дугового разряда. Здесь отсутствует термическое равновесие, нарушается условие квазинейтральности, осуществляется перенос зарядов из твердого тела в плазму или наоборот, в электрод поступает энергия, связанная с протеканием тока и переходящая в тепловую энергию. Перечень причин, приводящих к разрушению электродов, не может быть полным для любой конструктивной схемы плазмотрона.

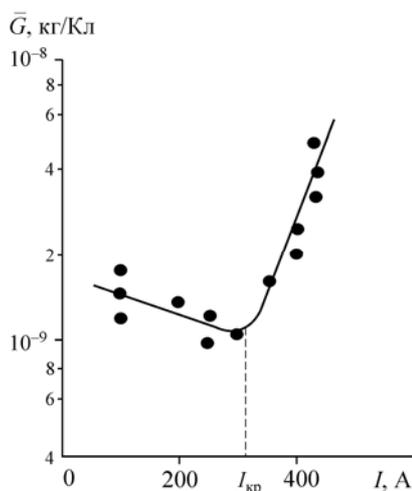
* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0118 (уникальный идентификатор проекта RFMEF160715X0118).

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований удельной эрозии электродов в зависимости от основных параметров плазмотрона с газовихревой стабилизацией дуги. Объектом исследования являются медные трубчатые электроды, как наиболее часто применяемые для нагрева окислительных сред (воздуха, водяного пара, кислорода). Эксперименты проводились на трехкамерном плазмотроне с выходным ступенчатым электродом [2, 3]. Внутренний электрод подключался к положительному или отрицательному полюсу тиристорного выпрямителя, являясь в одном случае катодом, а в другом — анодом. В торцевой крышке было установлено кварцевое стекло, через которое с помощью скоростной кинокамеры СКС-1М производилась съемка радиального участка дугового разряда. По торцам внутреннего электрода располагались кольца закрутки, через которые подавался воздух с расходами G_1 и G_2 для управления приэлектродным участком и опорным пятном дуги.

Унос эродированной массы Δm (кг) измерялся взвешиванием электрода до и после эксперимента длительностью от 30 минут до 2-х часов в зависимости от силы тока дугового разряда. Величина удельной эрозии, измеряемая в кг/Кл, определялась по формуле $\bar{G} = \Delta m / (I \cdot t)$, где I — ток дуги (А), t — время проведения опыта (с). Расходы охлаждающей воды и плазмообразующего воздуха, ток и напряжение дуги, весовые показатели электрода измерялись с точностью не хуже $\pm 1\%$.

В плазмотронах с газовихревой стабилизацией дугового разряда определяющими параметрами являются расход газа G , диаметр электрода d и давление в разрядной камере p . Они в полной мере ответственны за стабилизацию газового потока в полости электродов и скорость их разрушения (эрозию). Известно, что устойчивость вращающегося потока газа определяется соотношением $V\varphi \sim G/pd$, которое можно считать одним из параметров, влияющим на стабилизацию дуги в разрядной камере плазмотрона. Другим параметром, определяющим устойчивость газового потока в цилиндрическом электроде, является ток дуги. Экспериментально показано, что при достижении некоторого критического значения $I_{кр}$ скорость вращения газа резко падает, поток в полости электрода теряет устойчивость [2, 3].

Зависимости удельной эрозии катодов с различными диаметрами d в воздушной среде от тока дугового разряда имеют характерную особенность: наличие критического тока $I_{кр}$, превышение которого приводит к резкому возрастанию \bar{G} . Для примера на рис. 1 приведена зависимость \bar{G} медного трубчатого катода с $d = 2,1 \cdot 10^{-2}$ м ($I_{кр} = 300-320$ А). С ростом d до $5 \cdot 10^{-2}$ м $I_{кр}$ увеличивается до 600 А [4].



Анализ кинокадров радиального участка дуги при различных токах (рис. 2) показал, что в поведении разряда наблюдается три ярко выраженных режима. В первом режиме (рис. 2а), когда $I < I_{кр}$, катодное пятно равномерно и непрерывно движется по поверхности электрода. При приближении к критическому току $I \leq I_{кр}$ катодная струя практически перекрывает пространство электрода по диаметру (рис. 2б). В этом режиме начинает нарушаться равномерность вращения радиального участка дуги. Третьему режиму соответствует диапазон токов от $I_{кр}$ и выше (рис. 2с). В данном режиме

Рис. 1. Зависимость удельной эрозии катода от тока дуги.

$$d = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}, G_1/G_2 = 1.$$

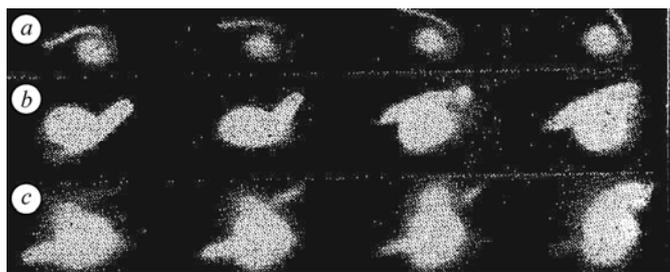


Рис. 2. Фотография радиального участка дуги в катоде.

$d = 5 \cdot 10^{-2}$ м; $I = 350$ (a), 500 (b), 750 (c) А.

помимо скачкообразного перемещения пятна по окружности электрода наблюдаются двойное дугообразование и остановка дуговых пятен. При $I > I_{кр}$ катод интенсивно разрушается. Установлено, что аналогичное явление характерно и для анода [5]. Одной из причин двойного дугообразования и резкого увеличения эрозии электрода (см. рис. 1) является потеря устойчивости вращающегося потока газа, стабилизирующего дугу, а дестабилизирующим фактором — катодная струя.

Обратимся теперь к **влиянию окружной компоненты скорости** перемещения дугового пятна V_{π} (по величине близкой к $V\varphi$) на эрозию электродов. Экспериментальные результаты приведены на рис. 3 для идентичных электродных узлов двухструйного плазмотрона [3]. При малых значениях $V_{\pi} \approx 5-7$ м/с уровень удельной эрозии составляет примерно 10^{-9} кг/Кл для анода и $(2-3) \cdot 10^{-9}$ кг/Кл для катода. С увеличением скорости V_{π} значение удельной эрозии анода заметно снижается, и при $V_{\pi} > 30$ м/с она достигает величины примерно $2 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл.

Как видно из рис. 3, удельная эрозия катода практически не зависит от скорости перемещения дугового пятна (при $V_{\pi} > 10$ м/с) и равна в среднем 10^{-9} кг/Кл. Такое отличие в величинах \bar{G} обусловлено механизмом протекания тока в приэлектродных областях. Если анод является коллектором электронов, то катод эмитирует электроны для поддержания непрерывности горения дугового разряда. В последнем случае температура в приэлектродной зоне должна быть близкой к температуре плавления меди или превышать ее (вплоть до появления катодных струй).

На основе экспериментальных данных по зависимостям удельной эрозии катода от тока дуги и скорости перемещения катодного пятна с учетом анализа уравнения сохранения импульсов для электродной струи в полости электрода **получены необходимые условия длительного ресурса электрода** в воздушной среде (все величины приведены в системе СИ) [4]:

$$G/pd \geq 2 \cdot 10^{-6},$$

$$I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G/p}, \quad (1)$$

где $G = G_1 + G_2$ — суммарный расход газа в полость внутреннего электрода. Для трубчатого анода, являющегося

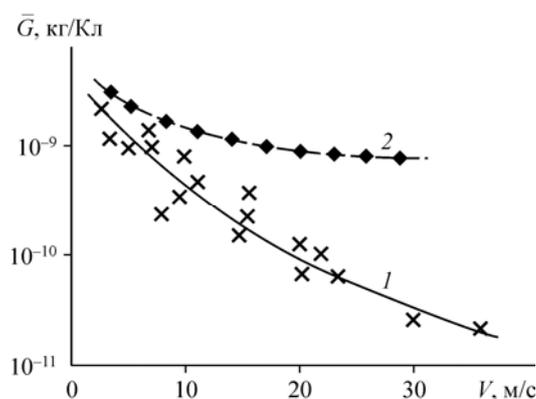


Рис. 3. Зависимость удельной эрозии медного трубчатого электрода от скорости движения пятна дуги.

$I = 250$ А, $d = 34 \cdot 10^{-3}$ м; 1 — анод, 2 — катод.

внутренним электродом в двух- или трехкамерном плазмотроне, эти условия записываются в виде:

$$G/pd \geq 4 \cdot 10^{-6}, \quad I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G/p}. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) можно трактовать как критерии работоспособности медных электродов в плазмотронах для нагрева кислородсодержащих сред. Они позволяют на стадии проектирования технологического плазмотрона для расчетных параметров G , d , p оценить ресурс непрерывной эксплуатации электродов. Соотношения (1) и (2) проверены в диапазоне токов I от 100 до 1000 А, диаметров d от $2 \cdot 10^{-2}$ до $9 \cdot 10^{-2}$ м, расходов воздуха G от $4 \cdot 10^{-3}$ до 0,1 кг/с, давлений в разрядной камере p от $1 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$ Па и обеспечивают достаточно верный для практического применения (с точностью до 10 %) выбор параметров G , d , p . Следует отметить, что ограничение по $I_{кр}$ в соотношениях (1) и (2) относится только к электродам с диаметром $d \leq 9 \cdot 10^{-2}$ м. При $d > 9 \cdot 10^{-2}$ м катодная струя уже не достигает противоположной стенки электрода и дуга горит в режиме $I < I_{кр}$.

Результаты приведенных исследований позволяют оценить реальный путь повышения ресурса трубчатых электродов следующим образом: величины расхода воздуха и геометрия полости электрода должны обеспечивать устойчивое стабилизирующее воздействие потока газа на дуговой разряд и при этом должны выполняться неравенства (1) и (2).

Реальным путем снижения удельной эрозии трубчатых электродов является также применение *возвратно-поступательного перемещения радиального участка дуги* вдоль оси электрода (сканирование с частотой 4–6 Гц) при его вращательном движении. При этом длина зоны сканирования пятна дуги вдоль электрода составляет 2–3 калибра. Экспериментально проверено влияние сканирования радиальных участков дуги с помощью пульсатора расходов газа на удельную эрозию электродов \bar{G} двухструйного плазмотрона [5]. Сканирование осуществлялось за счет непрерывного изменения расходов воздуха G_1 и G_2 при $G = G_1 + G_2 = \text{const}$. За время работы плазмотрона в течение 60 часов величина \bar{G} для катода оставалась на уровне 10^{-9} кг/Кл, а для анода — $\bar{G} \approx 6 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл [3, 5]. Отсюда следует важный вывод: сканирование опорного пятна дугового разряда вдоль поверхности электрода на глубину 2–3 калибров является эффективным средством повышения ресурса электродов и непрерывной работы плазмотрона.

В зоне действия пятна электрической дуги температура поверхности холодных электродов может достигать температуры плавления меди ($t_{пл} \approx 1083$ °С) и выше, приближаясь к температуре кипения ($t_{кип} \sim 2600$ °С). Под расплавленным слоем в структуре металла происходят сложные физико-химические процессы, приводящие к *образованию приповерхностных трещин* (рис. 4), снижающих теплопроводность и механическую прочность материала электрода [6]. На поверхности электродов образуются пленки окиси и закиси меди, существенно влияющие на эрозию электродов и пульсационные характеристики параметров дуги. Менее подвержены разрушению металлы в монокристаллическом состоянии или модифицированные ультра- и нанодисперсными порошками. С увеличением однородности структуры металла повышаются его физические и термомеханические свойства. Например, достичь существенного увеличения ресурса электродов можно введением в расплав меди ультрадисперсных порошков размером менее 0,1 мкм в количестве 0,01÷0,05 % по массе. Отсюда следует целесообразность модифицирования медных заготовок для электродов с целью существенного увеличения ресурса их работы. Эта технология достаточно подробно изложена в работе [7].

В работе [8] приведены результаты исследований однокамерного плазмотрона с внутренним электродом-анодом ступенчатой геометрии. Оригинальность конструктивной схемы генератора дуговой плазмы заключается в *расширении области разрушения анода за уступом* из-за аэродинамики потока во внутреннем электроде. Экспериментально

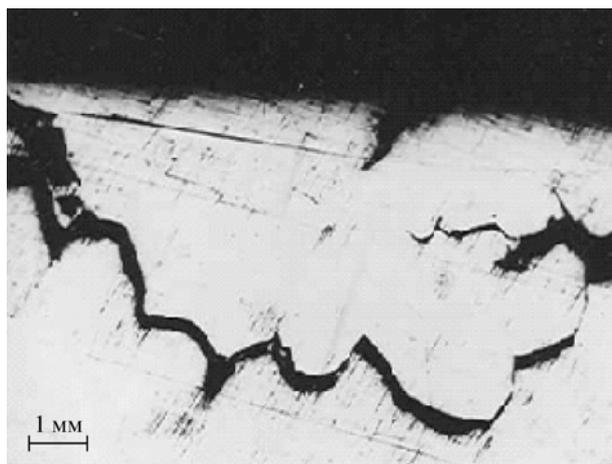


Рис. 4. Микротрещины в приповерхностном слое медного анода.

продемонстрирован реальный ресурс анода, составляющий 500 ч и более, при токах дугового разряда 550–600 А при нагреве технического азота. Плазматрон может работать как в струйном, так и в плавильном режимах. Переход на плазмообразующий газ (воздух) приведет к некоторому снижению времени непрерывной работы электрода при указанных токах дуги, но вполне приемлемому для организации технологических процессов.

Указанные выше мероприятия по увеличению ресурса электродов являются эффективными, но не ограничивают многообразие методов из-за существенных отличий конструктивных схем плазматронов. Так, например, хорошо зарекомендовал себя *самовосстанавливающийся катод из углеводородов* [9]. Экспериментально был показан рециклинг атомов вольфрама в зоне привязки катодного пятна на электроде в аргонной и азотной средах. При горении дуги в предельных углеводородах на электроде-катоде формируется постоянно возобновляющийся катод из газовой фазы углерода. При этом первоначальный катод выполняет лишь функции подложки, на который высаживается углерод, формирующий в дальнейшем собственно катод. Вначале процесса заметен рост его толщины. Затем прирост катода прекращается, т.е. наступает момент равенства скоростей испарения атомов и осаждения ионов углерода. Многочасовые испытания плазматрона для нагрева воздуха с самовосстанавливающимся катодом из пропана подтвердили длительный ресурс его работы в технологическом процессе розжига пылеугольных горелок на котлах ТЭС [10].

Как известно, в струйных плазматронах процесс шунтирования дуги характерен как для внутреннего, так и выходного электродов. Результаты визуальных наблюдений и пневмометрических исследований течения газа на холодных моделях показывают, что для устранения крупномасштабного шунтирования необходимо *усилить эффект вихревой стабилизации* во всем объеме внутреннего электрода. Увеличить значение $V\varphi(r)$ в пристеночной области можно только повышением скорости вдува газа через кольца закрутки за счет роста расхода газа. Однако эксперименты показали, что существенного улучшения работы плазматрона с ростом расходов через обе вихревые камеры не происходит.

Чтобы уменьшить величину расхода газа через разделительную диафрагму трехкамерного плазматрона и изменить профиль давления $p(r)$, необходимо *отвести часть холодного газа в атмосферу* через кольцевое отверстие в задней крышке электрода или каналы в диафрагме [11, 12]. Опытная проверка эффективности дополнительного отвода газа из полости внутреннего электрода на экспериментальном плазматроне показала, что такое техническое решение исключает возникновение крупномасштабного шунтирования и смещения опорного пятна дуги в осевом направлении к диафрагме. С организацией частичного отвода газа существенно снижается удельная эрозия трубчатого катода (от $2 \cdot 10^{-9}$ до $0,8 \cdot 10^{-10}$ кг/Кл) для токов дугового разряда до 1000 А.

Заключение

Разработаны критерии работоспособности медных трубчатых электродов в воздушной среде из числа определяющих параметров для эффективного воздействия на стабилизацию дугового разряда в полости электродов. Сегодняшние знания о влиянии геометрических и расходных параметров на скорость разрушения медных трубчатых электродов позволяют выбирать оптимальные технические решения для создания длительно работающих электродуговых плазмотронов. Экспериментально установлено, что при наличии тангенциального перемещения опорного пятна дугового разряда существенное увеличение ресурса трубчатых электродов достигается с помощью сканирования пятна вдоль рабочей поверхности электрода. Эффективным средством увеличения времени работы медных электродов является модифицирование их материала ультрали или нанодисперсными порошками для повышения термомеханической прочности. Экспериментально показано, что частичный отвод холодного газа из полости трубчатого катода позволяет удерживать высокие значения тангенциальной составляющей стабилизирующего потока и тем самым обеспечить равномерное перемещение опорного пятна дуги для повышения ресурса электрода.

Список литературы

1. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Аньшаков А.С., Хвесьюк В.И., Дюжев Г.А., Дандарон Г.-Н.Б. Новосибирск: Наука, 1982. 157 с.
2. Аньшаков А.С., Тимошевский А.Н., Быков А.Н., Урбах Э.К. Эрозия медного цилиндрического катода в воздушной среде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1988. № 7, вып. 2. С. 65–68.
3. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки: уч. для вузов. Изд. 3-е, доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 608 с.
4. Аньшаков А.С., Быков А.Н., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Взаимосвязь эрозионных процессов с аэродинамикой закрученного потока в цилиндрическом электроде плазмотрона // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 4. С. 623–632.
5. Урбах Э.К., Тимошевский А.Н., Быков А.Н. и др. Ресурсные характеристики электродов двухструйного плазмотрона // Тез. докл. XI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, ч. II. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1989. С. 46–47.
6. Дутова О.С. Термохимические процессы в материале электрода плазмотрона: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. 102 с.
7. Жуков М.Ф., Тимошевский А.Н., Черепанов А.Н. Механизмы эрозии электродов линейных плазмотронов // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4, № 2. С. 159–170.
8. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чередниченко В.С., Кузьмин М.Г., Урбах А.Э. Исследование генератора термической плазмы технологического назначения // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 805–808.
9. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Генераторы электродуговой термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
10. Гольш В.И., Карпенко Е.И., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Ушанов В.Ж. Высоко-ресурсный электродуговой плазмотрон // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43, № 4. С. 371–376.
11. Сударев А.И., Тимошевский А.Н. Экспериментальное исследование эрозии цилиндрического катода в воздухе и азоте // Теплофизические исследования / Под ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1977. С. 94–98.
12. Урбах Э.К. Разработка и исследование технологических электродуговых плазмотронов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.10. Новосибирск: НГТУ, 1992. 41 с.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2016 г.