

УДК 533.924

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ КАТОДОВ В ДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ

А.С. АНЬШАКОВ, Э.К. УРБАХ, А.Э. УРБАХ, В.А. ФАЛЕЕВ

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

Приведены результаты экспериментальных исследований термохимических катодов, изготовленных на основе гафния и циркония. Данные по тепловым потокам в электрод и его эрозии в зависимости от силы тока дуги позволили оценить ресурс работы гафниевого катода в кислородсодержащих средах. Предложена и реализована схема катода с четырьмя термоэмиссионными вставками из гафния, для существенного увеличения длительности его работы по сравнению с одиночной вставкой.

### ВВЕДЕНИЕ

В электродуговых плазматронах небольшой мощности, используемых для нагрева воздуха и других кислородсодержащих сред, а также для плазменной резки металлов, широко используются термохимические составные катоды (рис. 1, *a*). Они хотя и обеспечивают приемлемый для практики ресурс плазменных устройств, но задача увеличения длительности их работы остается актуальной. Эмиттером электронов в таких катодах служат циркониевые или гафниевые вставки, впаянные или запрессованные в медное водоохлаждаемое тело. Вставка должна эмиттировать необходимое количество электронов для поддержания тока при температуре ее рабочей поверхности, обеспечивающей низкое испарение и, соответственно, максимальный ресурс электрода.

Формула Ричардсона — Дешмана для определения плотности тока термоэмиссии

$$j_e = AT^2 \exp(-\phi/kT) \quad (1)$$

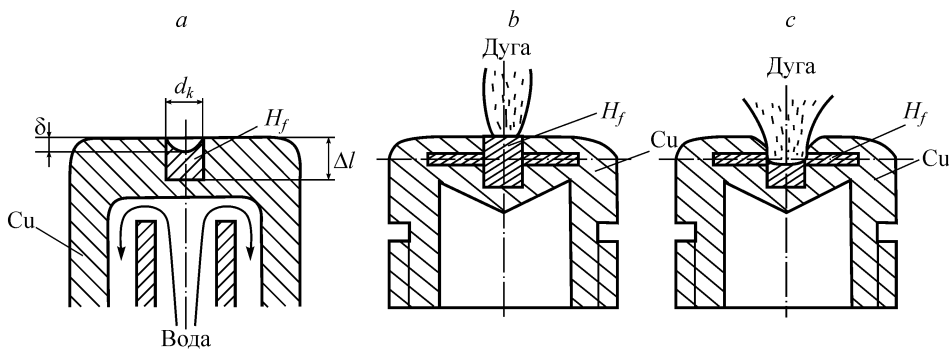


Рис. 1. Схемы термохимических катодов.

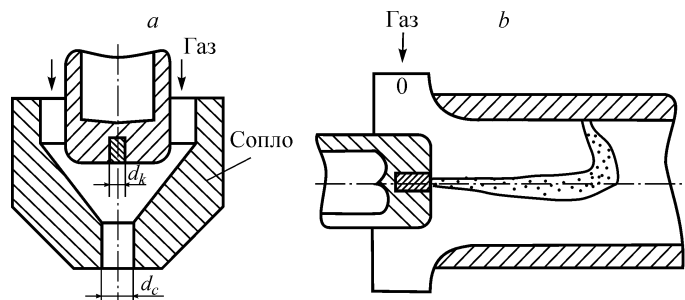


Рис. 2. Схемы плазматронов: для воздушно-плазменной резки металлов (а) и для нагрева кислородсодержащих сред (b).

показывает, что чем выше ток дуги при неизменных значениях работы выхода электронов  $\varphi$  и площади опорного пятна дуги, ограниченной размерами вставки, тем выше температура  $T$  ее рабочей поверхности. Нагрев вставки осуществляется тепловым потоком  $Q_k$ , поступающим от дуги в катод. В общем случае для термокатода он определяется по формуле

$$Q_k = I [S(U_k + U_i) - \varphi] + Q_0. \quad (2)$$

Здесь  $I$  — ток дуги,  $S$  — доля ионного тока,  $U_k$  — катодное падение потенциала,  $U_i$  — потенциал ионизации газа,  $\varphi$  — работа выхода электронов,  $Q_0$  — тепловой поток от дуги за счет теплопроводности и излучения. Из уравнения (2) видно, что тепловой поток  $Q_k$  пропорционален току дуги, что ведет к увеличению температуры вставки с ростом  $I$ . Поскольку с увеличением температуры скорость испарения материала электрода быстро растет (это касается всех металлов), то возрастает и его эрозия. В дальнейшем мы будем использовать термин “удельная эрозия”, определяемый по формуле  $\bar{G} = \Delta m / It$ , где  $\Delta m$  — унос массы электрода, кг;  $I$  — ток дуги, А;  $t$  — время, с. Размерность  $\bar{G}$  в кг/Кл.

Кроме основного параметра — тока  $I$ , на температуру рабочей поверхности вставки влияет много других факторов: диаметр и длина вставки, теплофизические свойства металла вставки, его окислов и нитридов ( $\lambda$ ,  $T_{пл}$ ,  $\varphi$ ), состав и давление рабочего газа, тепловой контакт вставка — медное тело или качество запрессовки вставок, интенсивность охлаждения электродов и многое другое. Обилие параметров, определяющих температурный режим термоэмиссионной вставки, затрудняет теоретическое исследование их влияния на работоспособность электрода. Поэтому основным методом исследования термокатодов является эксперимент.

Экспериментальное исследование эрозии термохимических катодов проводилось на двух плазменных устройствах: на линейном плазматроне для нагрева кислородсодержащих сред и на плазматроне для воздушно-плазменной резки металлов (рис. 2).

### 1. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ КАТОД С ОДИНОЧНОЙ ВСТАВКОЙ

Термохимический катод по существу является термокатодом, и свое название получил в связи с тем, что в воздухе высокотемпературная поверхность циркониевой (гафниевой) вставки химически взаимодействует с азотом и кислородом, образуя оксонитридную пленку, обладающую хорошими эмиссионными свойствами, электропроводностью и термостойкостью [1, 2]. Образовавшаяся пленка надежно

защищает циркониевую (гафниеую) вставку от дальнейшего окисления, что и обеспечивает работоспособность катода в воздушной среде.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости тепловых потоков в катод от тока. Как и следует из уравнения (2), тепловые потоки пропорциональны току дуги. Численное отличие кривых связано с тем, что измерения тепловых потоков проводились в разных условиях. Кривой 1 обозначены измерения, полученные на однокамерном плазмотроне линейной схемы (см. рис. 2, б), кривой 2 — на плазменном резаке (см. рис. 2, а), кривой 3 — в эксперименте со свободно горящей дугой [3]. Диаметр сопла резака равен 3,6 мм, а диаметр дугового канала в плазмотроне — 11 мм, что существенно больше, чем в резаке. Давление в плазмотроне слабо зависело от тока и не превышало  $1,2 \cdot 10^5$  Па, а в резаке при токе 320 А составляло  $1,5 \cdot 10^5$  Па. Учитывая, что измерения тепловых потоков проводились при одинаковых расходах охлаждающей воды, имеющееся численное отличие можно объяснить различием давлений в разрядной камере. Рост давления вызывает увеличение катодного падения потенциала  $U_k$  и излучения дуги, что ведет к увеличению теплового потока  $Q_k$  в катод (см. уравнение (2)).

Следует отметить, что по мере увеличения глубины  $\delta$  выработки электрода тепловой поток  $Q_k$  становится большим. Для примера на рис. 3 отмечены значения  $Q_k$  через 1, 2, 3 часа работы Hf-катода при токе 275 А (точки 5 – 7). Поэтому измерения тепловых потоков проводились в течение 10–15 мин на новых электродах, на которых значение  $\delta$  не превышало 0,5 мм. С увеличением теплового потока растет перепад температуры охлаждающей воды на входе и выходе из катодного узла. При условии постоянства расхода воды периодический контроль перепада температуры на входе и выходе позволяет определить ближайший отрезок времени, когда электрод выйдет из строя.

Электроды плазменных резаков типа ПВР с гафниевыми вставками  $d_k = 2,5$  мм выходят из строя при глубине выработки  $\delta \approx 2,5$  мм. При этом дуга переходит с гафниевой вставки на медь, медь попадает на гафний и электрод быстро (буквально в течение одной минуты) разрушается, вызывая при этом шунтирование дуги в промежутке катод–сопло–изделие (электрод–анод). Ток дуги резко возрастает, сопло выходит из строя.

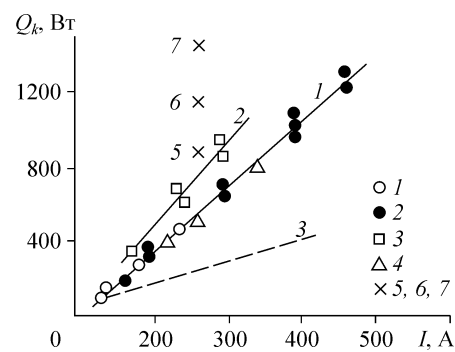
Большое влияние на работоспособность электрода оказывает диаметр гафниевой (циркониевой) вставки. В работе [2] показано, что оптимальный диаметр вставки  $d_k$  из обоих металлов при токе 300 А составляет 2,5 мм. Анализ литературных данных [1 – 8] и результатов наших экспериментов показал, что при токах до 80 А целесообразно использовать термовставки диаметром 1,6 мм; при  $80 \text{ А} \leq I \leq 200 \text{ А}$  –  $d_k = 2$  мм; при  $200 \text{ А} \leq I \leq 300 \text{ А}$  –  $d_k = 2,5$  мм; при  $300 \text{ А} \leq I \leq 400 \text{ А}$  –  $d_k = 3$  мм. Это связано с двумя факторами.

Во-первых, у гафниевых и циркониевых вставок низкая теплопроводность

Рис. 3. Зависимость теплового потока в катод

от тока дуги.

1, 3, 4 — Hf;  $d_k = 2-2,5$  (1), 2 (3), 2,5 (4) мм; 2 — Zr,  $d_k = 3$  (2) мм; 5, 6, 7 — значения  $Q_k$  через 1, 2, 3 ч работы Hf-катода,  $d_k = 2,5$  мм. Кривые 1–3 см. в тексте.



(при 1000 К теплопроводность  $\lambda_{Hf} = 20,7$  Вт/м·К,  $\lambda_{Zr} = 24$  Вт/м·К) и тепло от дугового пятна отводится в медную обойму в основном через узкий поясок боковой стенки вставки, а не через ее тело. Поэтому в случае, когда диаметр пятна дуги на вставке меньше ее диаметра, гафний под пятном дуги из-за плохой теплопроводности нагревается до температуры большей, чем это необходимо для обеспечения электронного тока (см. уравнение (1)), что вызывает повышенную эрозию электрода. Именно по этой причине невозможна работа катода, изготовленного целиком из гафния или циркония.

Вторым фактором повышения эрозии является увеличение плотности тока и температуры гафния под пятном дуги. Это происходит в условиях, когда диаметр вставки не соответствует рекомендуемой токовой нагрузке. Например, катод с диаметром вставки  $d_k = 2$  мм используется при токе свыше 200 А. Уже при токе 200 А (экспериментальный факт) диаметр дугового пятна (след оплавления) равен диаметру вставки. Далее с увеличением тока площадь пятна не увеличивается, но из-за этого плотность тока растет, соответственно (см. уравнение (1)) увеличивается температура рабочей поверхности вставки, что, собственно, ведет к повышенному износу электрода.

Эксплуатация катодов плазменного резака в производственных условиях при токе 300 А подтвердила, что катод с диаметром вставки 2 мм имеет срок службы в  $1,5 \div 2$  раза меньше, чем с  $d_k = 2,5$  мм. Причем разрушение медного тела электрода при  $I = 300$  А и  $d_k = 2$  мм, в отличие от электрода с диаметром вставки 2,5 мм ( $\delta \approx 3$  мм), происходит при меньшей глубине выработки ( $\delta \approx 2$  мм). При этом масса вставки с  $d_k = 2$  мм недоиспользуется.

На интенсивность охлаждения гафниевых вставок и износ электродов большое влияние оказывает качество их заделки в медном катододержателе, т. к. оно определяет надежность теплового и электрического контакта вставки с медью и ее рабочую температуру. Разные партии серийно выпускаемых катодов имеют разный ресурс, но в целом он невелик и в большой степени зависит от тока. На рис. 4 приведены результаты экспериментов по эрозии гафниевых и циркониевых катодов. Как видно из рисунка, величина удельной эрозии  $\bar{G}$  очень быстро растет с повышением тока. Зная объем вставки, который вырабатывается до разрушения электрода, по этим данным можно количественно оценить зависимость ее ресурса от тока. Из определения  $\bar{G} = \Delta m/It$  время работы вставки до ее износа составляет

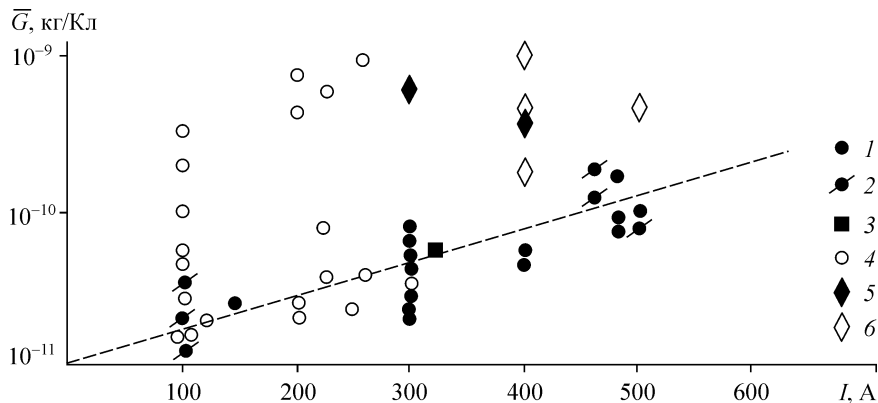


Рис. 4. Зависимость удельной эрозии электродов от тока дуги.

1 — Hf, 2 — Zr, 3 — Zr [1], 4 — Zr [5], 5 — Zr [6], 6 — Hf [6].

Рис. 5. Зависимость ресурса термокатода с одиночной вставкой от тока дуги.

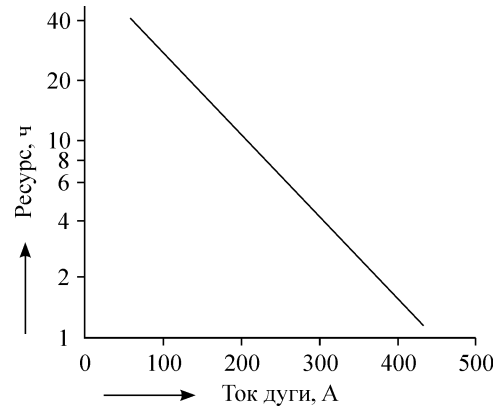
$$t = \frac{m}{\bar{G}I} = \frac{V\rho}{\bar{G}I} = \frac{\pi d^2 \delta \rho}{4\bar{G}I}. \quad (3)$$

Примем для наиболее широко используемого при плазменной резке гафниевого электрода:  $d_k = 2,5$  мм,  $\delta = 3$  мм,  $\rho_{Hf} = 13,31 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Рассчитанная для этих условий зависимость ресурса электрода от тока

представлена на рис. 5. График наглядно показывает, что термохимические катоды с одиночной вставкой целесообразно использовать только до  $I = 300$  А.

Приведенная на рис. 5 зависимость несколько идеализирована, поскольку при расчетах использовались только значения эрозии  $\bar{G}$ , лежащие на пунктирной кривой (см. рис. 4), в то время как есть еще точки, находящиеся много выше и ниже этой линии. Кроме того, предполагалось, что дуга весь период работоспособности электрода не отключалась. В действительности резка металла часто прерывается.

А поскольку пусковая эрозия электрода почти на порядок больше, чем в стационарном режиме [6, 7], то реальный ресурс катодов может быть ниже, чем показано на рис. 5.



#### ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ КАТОД С ЧЕТЫРЬМЯ ГАФНИЕВЫМИ ВСТАВКАМИ

Для повышения ресурса термохимического катода в Институте теплофизики СО РАН предложен и испытан [9] модифицированный гафниевый катод (см. рис. 1, *b*). Данный катод отличается от катода с одиночной термовставкой (см. рис. 1, *a*) тем, что в него помимо центральной вставки впрессованы еще три радиальных стержня через 120°. Диаметр центральной вставки  $d_k = 2,5$  мм, боковых — 1,6 мм.

Испытания катода на линейном плазмотроне с диаметром выходного электрода 11 мм показали, что его эрозия в начале работы, пока происходит выработка только центральной вставки, ниже, чем у катода с одиночной вставкой (рис. 6). Это связано с тем, что в данном плазмотроне давление газа в прикатодной области меньше, чем в плазменных резаках. Соответственно уменьшаются тепловой поток в катод (см. рис. 3, кривая 1) и температура рабочей вставки, что и приводит к уменьшению эрозии. Приведенные на рис. 6 результаты (отмеченные треугольниками) получены взвешиванием электрода до и после эксперимента. Время испытаний в непрерывном режиме работы составляло 1–2 ч. Для контроля, помимо взвешивания, проводились измерения глубины выработки гафния, позволяющие рассчитать его удельную эрозию  $\bar{G}$ . Большой разброс данных обусловлен тем, что кроме износа центральной гафниевой вставки при запусках плазмотрона происходит также унос меди с катододержателя.

В катоде с дополнительными гафниевыми вставками после выработки центральной вставки катодное пятно распределяется на все вставки (см. рис. 1, *c*). Анализ характера износа катода показывает, что при этом площадь привязки

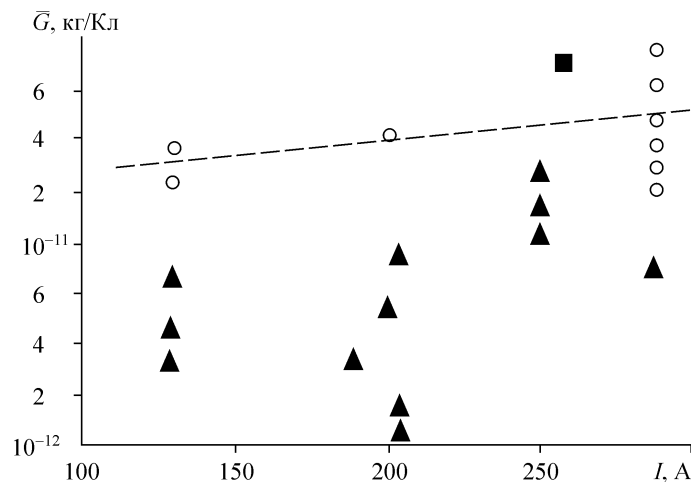


Рис. 6. Зависимость удельной эрозии модифицированного гафниевого термокатода от тока дуги.

▲ — стационарный режим горения дуги, ■ — пусковой режим.

опорного пятна дуги в 1,5 раза больше, чем при одной центральной вставке. Плотности тока и теплового потока снижаются. Поэтому уменьшается температура рабочей поверхности вставок, что и должно положительно отразиться на их эрозии. Эксперименты подтверждают это. Большинство экспериментальных точек (см. рис. 6, значки ▲) лежит ниже, чем для катода с одиночной вставкой (отмечено знаком ○). Ресурс катода с четырьмя вставками выше, чем с одной, как за счет снижения величины удельной эрозии, так и за счет увеличения массы гафниевых вставок. Средняя эрозия катода при работе плазмотрона в стационарном режиме при токе 150 – 300 А, рассчитанная по глубине выработки вставок за 25 ч работы, составляет около  $10^{-11}$  кг/Кл. Ресурс электрода при токе 200 А оценивается в 90 ч, что существенно выше, чем у катода с одиночной вставкой.

Испытания такого же катода на плазменном резаке с диаметром сопла 3,2 мм при токе 260 А в пусковом режиме (48 запусков по  $\Delta t = 5$  мин) показали, что величина удельной эрозии составляет  $\approx 8 \cdot 10^{-11}$  кг/Кл (см. рис. 6, значок ■). Это несколько выше, чем в стационарном режиме, поскольку в данном случае пусковая эрозия термохимических катодов много больше [6 – 8], да и давление в плазменном резаке выше, чем в линейном плазмотроне. В производственных условиях ресурс катода с четырьмя вставками ( $I = 320$  А) в плазменном резаке составляет 6 ч и более, что на треть выше, чем показано на рис. 5 для одиночной Hf-вставки.

В целом полученные результаты показывают перспективность разработки термохимических катодов с несколькими вставками для увеличения ресурса термокатодов в технологических плазмотронах для работы в кислородсодержащих плазмообразующих средах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эсбиян Э.М., Данченко М.Е. Воздушно-плазменная резка металлов плазмотроном с циркониевым катодом // Автоматическая сварка. — 1967. — № 5. — С. 76–77.
2. Аньшаков А.С., Бутова М.Н. и др. Исследование эрозии термохимических катодов // Тр. V Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. — Новосибирск, Ин-т теплофиз. СО АН СССР, 1972. — Т. 2. — С. 48–52.

3. Жуков М.Ф., Пустогаров А.В. и др. Термохимические катоды. — Новосибирск, Ин-т теплофиз. СО АН СССР, 1982. — 157 с.
4. Быховский Д.Г. Плазменная резка. — М: Машиностроение, 1972. — 242 с.
5. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Дандарон Г.-Н.Б. Эрозия электродов. // Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов / Сб. статей. — Новосибирск, 1977. — С. 123–148.
6. Болотов А.В., Борисова Т.В. Термохимический катод: конструкция и работа. // Тр. IV Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. — Алма-Ата, 1970. — С. 268–271.
7. Ачеусова И.И., Бутова М.Н. и др. Исследование ресурса катодов с термоэмиссионными вставками // Тр. VI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. — Фрунзе: Илим, 1974. — С. 332–335.
8. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. — Новосибирск: Наука, 1982. — 158 с.
9. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э. и др. Плазмотроны малой и средней мощности для розжига теплофикационных котлов // Нетрадиционные технологии в строительстве / Материалы Второго межд. науч.-техн. сем. (30.05–1.06.2001, г. Томск). — Томск: Изд-во ТГАСУ, 2001. — С. 59–69.

*Статья поступила в редакцию 29 сентября 2005 г.*