

УДК 533.924

Эрозия термоэмиссионных катодов в плазмотроне*

А.С. Аньшаков, П.В. Домаров

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

E-mail: Domaroff@yandex.ru

Представлены результаты исследований сплошных вольфрамовых катодов стержневого типа в разных газах. Определены тепловые состояния электродов под действием прикатодной плазмы, излучения и джоулева тепловыделения. Показана тепловая природа скорости разрушения (эрозии) термокатода в зависимости от основных определяющих параметров дугового разряда и конструктивных особенностей катодного узла. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности длительного ресурса W-катодов в технологических плазмотронах.

Ключевые слова: электродуговой плазмотрон, термокатод, эмиссия электронов, плотность тока, тепловой поток, эрозия электрода, ресурс работы.

Введение

Среди технологических проблем применения электродуговой плазмы наиболее актуальной является скорость разрушения (эрозия) электродов и термокатодов, в частности, в дуговых плазмотронах, обеспечивающих требуемый ресурс непрерывной работы плазменного устройства. Термоэмиссионные катоды широко применяются в плазменных ускорителях, светотехнике, электродуговых плазмотронах, в металлообработке.

Эрозия термокатодов обусловлена многофакторными электрофизическими, аэродинамическими и тепловыми процессами в приэлектродных областях дугового разряда, на поверхности и внутри катода. Вследствие этого пути решения проблемы ресурса электродов разнообразны и зависят от условий эксплуатации, назначения плазмотронов и, соответственно, от технологического процесса и рода плазмообразующего газа, силы тока и давления в разрядной камере. Необходимо отметить, что в настоящее время достаточно разработанной общей теории катодных процессов не существует.

Эрозия термоэмиссионных катодов определяется тепловыми нагрузками в месте контакта неподвижного опорного пятна дуги с поверхностью металла, которые непосредственно связаны с физическими процессами в приэлектродных областях разряда [1]. При малой доле в общем балансе тепла тепловые и электрофизические процессы в областях контакта дуги с электродами оказывают решающее влияние на скорость их разрушения и ресурс работы.

* Работа выполнена в рамках программы госзадания ИТ СО РАН (№ гос. рег. АААА-121031800229-1).

Открытое в 70-е годы прошлого века фундаментальное явление — рециклинг атомов вольфрама — позволило объяснить многие экспериментальные результаты по ресурсу вольфрамовых катодов. Суть явления состоит в том, что атомы испарившегося в зоне пятна дуги вольфрама, попадая в столб дуги, ионизируются и электрическим полем возвращаются в виде ионов на торцевую поверхность катода. Экспериментальное подтверждение рециклинга приведено в работе [2].

Тепловой поток в термокатод

По особенностям прикатодных процессов дуги подразделяются на три типа: с нестационарными быстро перемещающимися пятнами, со стационарными пятнами и без пятна. Следует отметить, что переход от одного типа привязки к другому всегда связан с тепловым режимом термокатада. Так, например, в начальный период горения дуги наблюдаются нестационарные пятна с малым временем жизни ($\tau \sim 10^{-5}$ с) и большими плотностями тока ($j > 10^5$ А/см²), затем, по мере прогрева электрода время жизни пятен увеличивается ($\tau \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ с) и уменьшается плотность тока в пятне ($j \sim 10^4$ А/см²). Дальнейший нагрев электрода приводит к образованию стационарного пятна с последующим переходом к дуге без пятна. Тип привязки характеризуется главным образом плотностью тока эмиссии на катоде, которая, как известно, определяется формулой Ричардсона–Дэшмана: $j_e = AT^2 \exp(-e\phi/kT)$. Здесь существенное значение имеет работа выхода электрона ϕ . Например, для чистого вольфрама $\phi = 4,5$ В, а для активированного окисью тория $\phi = 2,63$ В. Снижение работы выхода приводит к более низкому значению j_e и тепловой нагрузки на поверхность катода под пятном дуги.

Экспериментальная установка для измерения тепловых потоков, поступающих в стержневой вольфрамовый катод, схематически представлена на рис. 1. Катод 2 длиной l_c и диаметром $d_c = 0,5$ см заделан в медный водоохлаждаемый держатель 1 и установлен соосно с калориметрируемой диафрагмой 3. Промежуток между диафрагмой и стержнем образует узкую кольцевую щель 4 шириной 0,1 см, через которую подается плазмообразующий газ с расходом G . Уравнение баланса энергии для схемы рис. 1 записывается в виде

$$Q_{\Pi} = Q_1 + Q_k + Q_{\text{л}} + Q_{\text{г}} - Q_{\text{дж}}, \quad (1)$$

здесь Q_1 — количество тепла, снимаемое водой через сечение А-А, Q_k — тепло, поступающее в диафрагму за счет конвекции, $Q_{\text{л}}$ — лучистая энергия, поступающая в диафрагму, $Q_{\text{г}}$ — энергия в газе на выходе из щели через сечение В-В, $Q_{\text{дж}}$ — джоулево тепло в объеме стержня. Тепловой поток через пятно дуги Q_{Π} определялся расчетным путем. Остальные величины поддаются прямому измерению. Измерение температуры газа на выходе из щели выполнялось при помощи термопары 5.

Исследование тепловых потоков Q_{Π} , поступающих в катод, осуществлялось в ар-

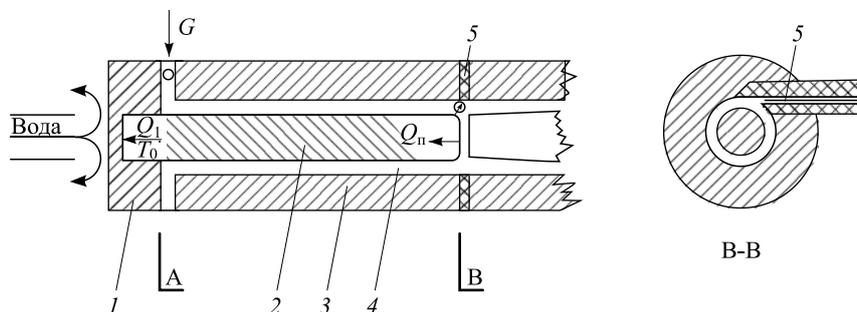


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — держатель, 2 — катод, 3 — калориметрируемая диафрагма, 4 — кольцевая щель, 5 — термопара.

Рис. 2. Зависимость теплового потока в катод от тока дуги в аргоне.

$l_c = 0$ (1), 0,6 (2), 1,2 (3), 6,0 (4) см.

гоне, азоте, гелии и водороде при различных длинах вольфрамового стержня. Типичные данные по зависимости $Q_{\text{п}}$ от тока дуги в аргоне для различных длин выступающей части стержня l_c приведены на рис. 2 (предельные токи, при которых электрод под пятном дуги плавился, отмечены пунктиром). Аналогичные данные получены для других газов. Тепловые потоки в W-катод для $l_c = 0$ практически совпадают для исследованных газов ($Q_{\text{п}}$ для азота и водорода получены путем вычитания энергии рекомбинации этих молекул).

С учетом энергии диссоциации молекулярных газов тепловой поток в катод через опорное пятно дуги определяется по формуле

$$Q_{\text{п}} = I [S_i (U_k + U_i - U_{\text{дис}}) - \varphi] + Q_0, \quad (2)$$

где $S_i = I_i/I$ — доля ионного тока, U_k — катодное падение потенциала, $U_{\text{дис}}$ — потенциал диссоциации, U_i — потенциал ионизации газа, φ — работа выхода электрона, Q_0 — неучтенные потоки тепла за счет обратных электронов, теплопроводности.

Температурный режим термокатодов

Объект исследования — тонкий стержень, который с одного конца нагревается дуговой плазмой $Q_{\text{п}}$, а другой конец его находится в водоохлаждаемом держателе при температуре T_0 . Модель катодного узла соответствует рис. 1.

Одномерное уравнение теплопроводности стержня записывается в виде

$$\frac{d}{dz} \left(\lambda \frac{dT}{dz} \right) = \frac{2\alpha}{r_c} (T - T_0) + \frac{2\sigma_0 \varepsilon}{r_c} (T^4 - T_0^4) - \frac{0,24 \rho I^2}{(\pi r_c^2)^2}, \quad (3)$$

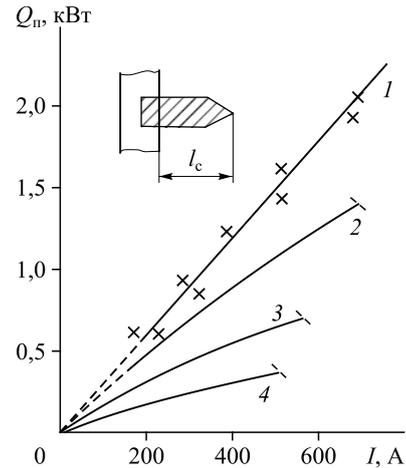
где λ и α — соответственно коэффициенты теплопроводности стержня и теплоотдачи от него газа, r_c — радиус стержня, ρ и ε — соответственно удельное электросопротивление и интегральный поток излучения W-катода, σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана. Первое слагаемое правой части уравнения (3) описывает энергию, отводимую газом от стержня при конвективном теплообмене, второе — энергию излучения нагретым стержнем, третий член — джоулево тепло, выделяемое в стержне. Левая часть уравнения отражает энергию, отводимую через торцевую часть стержня за счет теплопроводности. При течении газа в узкой кольцевой щели коэффициент теплоотдачи α рассчитывается по формуле

$$\text{Nu} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{Re}_d^{0,8} \text{Pr}^{0,4} (D/d_c)^{0,25}. \quad (4)$$

Граничные условия для решения уравнения (3) задаются на охлаждаемом конце стержня:

$$\text{при } z = 0 \quad \lambda \pi r_c^2 \frac{dT}{dz} = Q_1, \quad T = T_0 = 300 \text{ К}. \quad (5)$$

Задача решалась численным методом. При расчете учитывалось, что коэффициенты переноса λ , α , ρ , ε являются функциями температуры. Для определения предельных значений тепловых потоков, которые могут привести к расплавлению рабочей поверх-



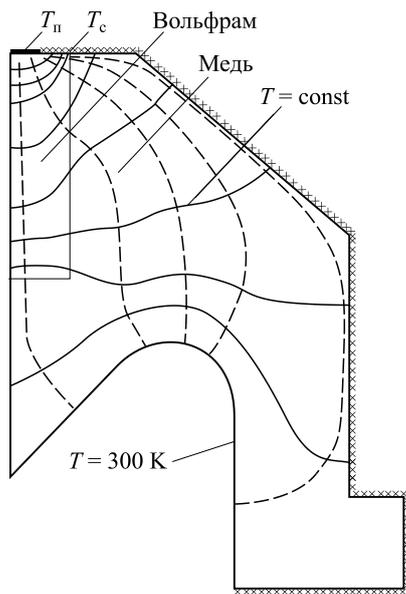


Рис. 3. Распределение эквитермических поверхностей в составном катоде.

ности катода, и полей температур в стержне уравнение (3) интегрировалось до температуры плавления $T_{пл}$.

Из анализа полученных зависимостей осевой температуры W-стержня длиной l_c от тока по формулам (3)–(5) следует, что джоулево тепло, выделяющееся в объеме стержня, существенно влияет на профиль распределения температуры по длине катода. Расчет и эксперимент показывают, что с ростом l_c тепловой поток в катод уменьшается из-за джоулева нагрева. По мере уменьшения длины катода l_c расчет температурного режима стержня по формуле (3) становится неправомерен и в предельном случае, когда $l_c = 0$, необходимо решать двумерную задачу с помощью уравнения Лапласа $\Delta T = 0$.

Задача о распределении поля температур в составном катоде моделировалась методом электрических сеток и решалась на электроинтеграторе ЭИ-12. Для моделирования был выбран W-катод реального плазмотрона. Задавалась прямоугольная тепловая нагрузка $Q_{п}$ на участок W-стержня в пределах дугового пятна $d_{п}$. Величины тепловых потоков и размеры привязки дуги были взяты из экспериментов. С тыльной стороны электрода температура принималась равной $T_0 = 300$ К. Поверхности электрода, исключая зоны нагрева и охлаждения, считались теплоизолированными. Типичное распределение эквитермических поверхностей в составном катоде представлено на рис. 3 (сплошные кривые). Видно, что тепловой поток в основном растекается в радиальном направлении (пунктирные кривые). Вследствие этого на температурный режим электрода оказывают сильное влияние как геометрические размеры, так и конфигурация медного держателя.

Эрозия электродов

Как было указано, объектом исследования являются сплошные термоэмиссионные вольфрамовые катоды цилиндрической формы в бескислородной среде. Они, как правило, активированы двуокисями тория, иттрия и лантана для снижения работы выхода электрона из металла.

Удельная эрозия электрода \bar{G} определяется как унос массы материала Δm , отнесенной к величине тока I в единицу времени t , т.е. $\bar{G} = \Delta m / (I \cdot t)$, кг/Кл. Зная величины \bar{G} и Δm , достаточно просто оценить ресурс непрерывной работы электрода при данном токе дугового разряда.

Под действием мощного источника тепла со стороны приэлектродного участка дуги на поверхности катода происходят процессы интенсивного плавления, испарения, кипения и взрывообразного разрушения, которые собственно и определяют эрозию электродов. Эффективным путем снижения эрозии W-катода является уменьшение поверхности, с которой происходит унос вольфрама. Эксперименты [1, 3, 4] показали, что уменьшение длины стержневого электрода ($l_c > 0$) приводит к снижению \bar{G} и минимальная величина ее достигается при $l_c = 0$. Расчетно-экспериментальные данные

по удельной эрозии стержневых вольфрамовых катодов в зависимости от тока дуги в аргоне приведены на рис. 4.

Предполагая испарительный механизм электрода, можно определить удельную эрозию термокатода из системы одномерных уравнений, состоящей из уравнения (3), уравнения

$$\bar{G} = \frac{2\pi r_c}{I} \int_0^{l_c} q(T) dz \quad (6)$$

и граничных условий (5). Результат расчета для стержневого катода $d_c = 0,5$ см и $l_c = 6$ см хорошо согласуется с данными эксперимента (рис. 4).

В азотной среде приэлектродный участок дуги контрагирован сильнее, чем в аргоне, что приводит к росту удельного теплового потока, поступающего в катод, и в силу этого к более интенсивному разрушению W-катада при $l_c > 0$. В этом случае на величину \bar{G} помимо испарения влияет ещё и капельный унос термокатода.

На W-стержне, заделанном заподлицо с интенсивно охлаждаемой медной обоймой ($l_c = 0$), реализуется дуга со стационарным катодным пятном. Размеры пятна дуги на электроде в несколько раз меньше, чем при горении дуги без пятна. В силу этого испарение металла происходит с малой площади. Кроме того, здесь в полной мере срабатывает процесс рециклинга атомов вольфрама.

Экспериментальные данные по удельной эрозии торированных и лантанированных W-катодов в зависимости от тока дуги приведены на рис. 5 [4]. Разброс результатов измерений в значительной мере обусловлен чистотой плазмообразующих газов. Можно, конечно, поступить как в исследовании [3]: область \bar{G} от 10^{-11} до 10^{-13} кг/Кл в диапазоне токов от 0 до 1000 А заштриховать и там получить любые необходимые результаты, однако приведенные конкретные результаты более ценны.

Анализ данных рис. 5 показывает возможности W-катодов. В аргоне \bar{G} составляет $8 \cdot 10^{-13}$ кг/Кл при $I = 680$ А (длительность испытаний — 200 ч), в гелии при $I = 600$ А величина $\bar{G} = 5 \cdot 10^{-13}$ кг/Кл. При токе 500–700 А в азоте $\bar{G} = (1,52–8,35) \cdot 10^{-13}$ кг/Кл (при опытно-промышленных испытаниях до 130 ч) и в водороде $\bar{G} = 5 \cdot 10^{-13} – 1 \cdot 10^{-12}$ кг/Кл при $t = 120–130$ ч. Эти данные получены при хорошей стабилизации пятна дуги, использовании химически чистых сред и оптимизации температурного режима стержневого катода. В смеси 10–20 % Ag и 80–90 % He в промышленных условиях эрозия иттрированного стержневого W-катада ($d_c = 1,3$ см, $l_c \sim 5$ калибров) при токе 1,9–2,3 А составила $\bar{G} = 1,4–1,9 \cdot 10^{-12}$ кг/Кл (ВИЛС, Москва).

Удельная эрозия W-катада при $l_c = 0$ зависит не только от тока дуги, но и от диаметра вольфрамовой вставки. При некотором значении диаметра W-стержня d_c^0 и при

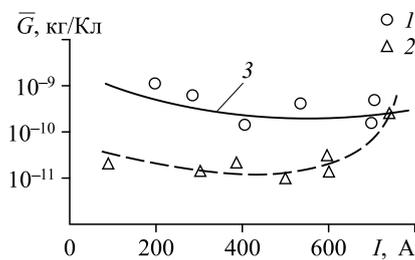


Рис. 4. Зависимость удельной эрозии стержневого катода от тока дуги. Рабочий газ — аргон; 1 — $l_c = 6$ см, $d_c = 0,5$ см, 2 — $l_c = 1,5$ см, $d_c = 0,4$ см; 3 — расчет по формулам (3) и (6).

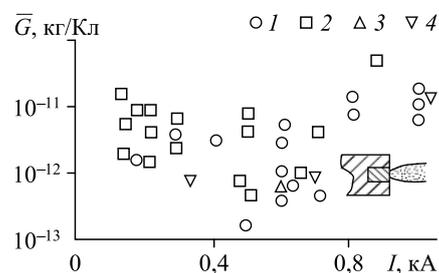


Рис. 5. Зависимость удельной эрозии вольфрамового катода от тока дуги в разных газах. 1 — N_2 , 2 — H_2 , 3 — He, 4 — Ar.

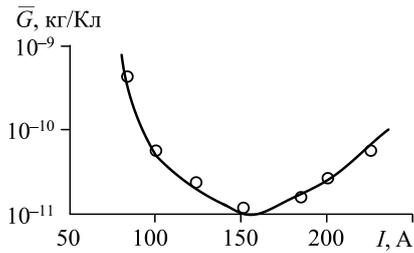


Рис. 6. Зависимость удельной эрозии стержневого вольфрамового катода ($d_c = 0,2$ см, $l_c = 25$ см) в гелии.

$I = \text{const}$ наблюдается минимальная удельная эрозия. Например, в среде азота при $I = 1000$ А минимальный диаметр W-вставки равен 0,4 см, а в водороде при $I \sim 400$ А $d_c^0 = 0,45$ см. Поэтому значение оптимального d_c рекомендуется выбирать на 10–30 % больше размера катодного пятна дуги. Аналогичная связь наблюдается для стержневого катода в зависимости от тока дуги (рис. 6, расчет \bar{G} по данным А.В. Пустогарова).

В целях сохранения минимальной эрозии катода необходимо, чтобы между вольфрамовым катодом и медным охлаждаемым корпусом всегда существовал хороший тепловой и электрический контакт, т.к. тепло в основном переносится через боковую поверхность W-стержня (см. рис. 3). Поэтому размер и конфигурация медного корпуса, организация его охлаждения, способ заделки W-катода играют существенную роль в обеспечении длительного ресурса катодного узла в целом.

Заключение

Установлено, что эрозия электродов вообще и вольфрамового катода в частности в первую очередь определяется тепловыми нагрузками в месте контакта неподвижного опорного пятна дуги с поверхностью металла, в котором происходит интенсивный унос материала электрода путем испарения и капельного разбрызгивания.

Приведены расчетно-экспериментальные данные по тепловому состоянию термокатода, способствующие оптимизации параметров по геометрическим размерам, охлаждению, току дугового разряда, длины W-стержня.

Впервые оказалось возможным расчетные результаты температурного состояния стержневого W-катода перенести на эксперимент по измерению удельной эрозии с хорошей точностью.

Показано влияние джоулева тепловыделения в стержне и конвективного теплопереноса на температурный режим катода. Получены и проанализированы экспериментальные результаты исследований эрозии W-катодов в аргоне, азоте, гелии и водороде в зависимости от тока дуги и диаметра электрода, в т.ч. при длительных испытаниях (100–200 ч).

Список литературы

1. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В., Аньшаков А.С., Хвесьюк В.И., Дюжев Г.А., Дандарон Г.-Н.Б. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск: Наука, 1982. 157 с.
2. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Хвесьюк В.И., Гужков В.В., Цыдыпов Б.Д. Динамика паров металла в пристенных слоях плазмы // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 6. С. 1354–1356.
3. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Электродуговые генераторы термической плазмы (Низкотемпературная плазма; Т. 17). Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
4. Чердниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 602 с.

Статья поступила в редакцию 11 июня 2021 г.,
после доработки — 11 июня 2021 г.,
принята к публикации 30 июля 2021 г.