

04

Динамика теплофизических параметров и эрозии активированного термоэмиссионного катода

© Б.Д. Цыдыпов

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ
E-mail: tsydyovbd@rambler.ru

Поступило в Редакцию 18 мая 2015 г.

Впервые экспериментально измерены временные зависимости кондуктивного теплового потока, температурного поля и удельной эрозии стержневых катодов из торированного и чистого поликристаллического вольфрама в течение длительного (20 h) горения дугового разряда. Исследованы закономерности динамики термического состояния и удельной эрозии электродов в зависимости от токовой нагрузки, давления плазмообразующего газа Ar и катодного материала. Показано, что динамика интегральных параметров активированного электрода определяется интенсивностью испарения легирующей присадки.

Тепловое состояние и уровень эрозии термоэмиссионных катодов сильноточных плазменных систем определяют работоспособность и ресурс их работы [1,2]. Наибольшие эксплуатационные характеристики получены при использовании электродов из тугоплавких металлов, легированных окислами редкоземельных элементов с высокими эмиссионными свойствами [3]. Повышение термоэмиссии катодного материала за счет присадок с малой работой выхода электронов приводит к существенному снижению рабочей температуры при номинальной токовой нагрузке, скорости испарения и соответственно удельной эрозии электрода. Однако в процессе работы плазменного устройства из-за высокотемпературной диффузии присадки к горячему торцу интенсивного испарения с поверхности металла повышаются работа выхода электронов $e\phi$, уровень температуры и удельная эрозия катода. Изучение динамики этих параметров с целью их минимизации является одной из основных задач в исследовании термоэмиссионных катодов данного класса. Ранее в [4] методом контактной разности потенциалов измерены распределения работы выхода электронов по длине и рабочему торцу

активированного W-катода, исследована динамика $e\varphi(z)$ в течении 20 h горения дугового разряда при различных токовых нагрузках.

В данной работе экспериментально исследована динамика основных теплофизических параметров термоэмиссионного катода: теплового потока в катод $Q_h(t)$, температурного поля $T(z, t)$ и удельной эрозии $G(t)$ в процессе длительного функционирования плазменного устройства. Схема экспериментальной плазменной установки представлена на рис. 1 [4]. В вакуумно-герметичной камере с наполнением Ag между охлаждаемыми цилиндрическими электродами с межэлектродным промежутком 30 mm инициировался дуговой разряд. Катод из торированного вольфрама ВТ-15 диаметром $d = 4$ mm, длиной $L = 20$ mm устанавливался в держатель цанговым зажимом с длиной вылета $L_c = 10$ mm. Анод из чистого поликристаллического вольфрама ($d = 10$ mm, $L = 25$ mm) запрессован в корпус держателя — обоймы. Рабочие торцы электродов заточены в виде полусфер. Давление Ag и токовые нагрузки варьировались в пределах $10^3 - 1.01 \cdot 10^5$ Pa и 20–150 A соответственно. Основная серия экспериментов проведена в диапазоне давлений $2.67 \cdot 10^3 - 2.67 \cdot 10^4$ Pa, где вклад плазмы разряда в измерение температуры электрода оптическими методами незначителен [3]. Температурный профиль катода определялся с пространственным шагом 1 mm вдоль всей длины вылета электрода из держателя. Для этого использовался оптический микропирометр с пространственным разрешением 0.1 mm. При определении теплового потока Q_h , уносимого охлаждающей жидкостью, применялся метод калориметрирования. Для измерения использовались термопары типа хромель–копель, показания которых регистрировались потенциометром, а массовый расход вод выбирался так, чтобы разность температур на входе и выходе охлаждающих трактов составляла $\Delta T > 20$ K, что обеспечивало точность измерения не хуже 8%. Изменение массы катода находилось его взвешиванием на аналитических весах до и после эксперимента. Удельная эрозия электрода определялась с относительной погрешностью менее 3%.

Измерения проводились по следующей методике. Дуговой разряд зажигался при фиксированных значениях давления газа и токовой нагрузки, и после установления стабильного стационарного горения дуги (~ 500 s), контролируемого калориметрическим и пирометрическим методами, измерялись начальный ($t = 0$) профиль температуры катода $T(z)$ и тепловой поток Q_h . После 1 h непрерывной работы измерялись текущие значения этих параметров, затем ток отключался,

катод снимался с держателя и определялась его эрозия. Такие циклы измерений повторялись с интервалами 1, 2, 4, 6 h до суммарного времени 20 h на каждом токовом режиме в диапазоне 20–150 А. В результате впервые получены временные зависимости основных интегральных теплофизических параметров активированного термокатода в течение длительного времени. Измерения проведены в основном при силе тока $I = 50$ А с минимальным уровнем $e\varphi(t)$ (см. рис. 3 [4]).

Эксперименты показали, что на всех токовых режимах интегральный тепловой поток $Q_h(t)$ в процессе работы катодов монотонно возрастает. При этом количественный рост $\Delta Q_h(t)$ и его скорость dQ_h/dt существенно зависят от тока разряда и давления аргона в камере.

На рис. 1 представлены зависимости $Q_h(t)$ от давления плазмообразующего газа p при токе $I = 50$ А. При высоких давлениях $2.67 \cdot 10^4$ (кривая 2) и $1.33 \cdot 10^4$ Па (кривая 1) интенсивный рост $Q_h(t)$ наблюдается в первые 2 h работы катода, затем dQ_h/dt резко снижается и за 18 h дальнейших испытаний тепловой поток увеличивается соответственно на 18 и 15 W. При понижении давления до $2.67 \cdot 10^3$ Па (кривая 3) график $Q_h(t)$ трансформируется в более пологую кривую, так как величина dQ_h/dt уменьшается, но она сохраняется на достаточно высоком значении ~ 3 W/h более 10 h, что дает прирост $\Delta Q_h = 30$ W. Далее функция $Q_h(p, t)$ медленно растет со скоростью 0.7 W/h до 127 W (20 h). Отмеченное поведение $Q_h(p, t)$ объясняется сильной зависимостью скорости испарения активирующего элемента от давления среды, приводящей к быстрому возрастанию $e\varphi(z)$ и $T(z)$ активной зоны электрода [5]. С уменьшением токовой нагрузки при фиксированных давлениях наблюдается значительный рост dQ_h/dt при общем снижении уровня Q_h . Например, при $I = 20$ А и $p = 1.33 \cdot 10^4$ Па кондуктивный тепловой поток за 20 h возрастает в 2.4 раза.

Возрастание тепловых потоков в катод приводит к существенному увеличению уровня температуры $T(z)$ на всей поверхности электрода (рис. 2). Наибольший прирост $T(z)$ наблюдается в месте контакта дуги с катодом, что особенно проявляется в начальные 2 h испытаний. За это время температура на рабочем торце T_c увеличивается примерно на 400 K, перепад температуры на расстоянии 1 mm составляет более 900 K. После 4 h работы электрода T_c устанавливается на уровне 3200 K и в дальнейшем изменяется незначительно (~ 100 K). На боковой поверхности катода профиль $T(z)$ эквидистантно растет в течение всего цикла измерений примерно на 200 K. С понижением давления

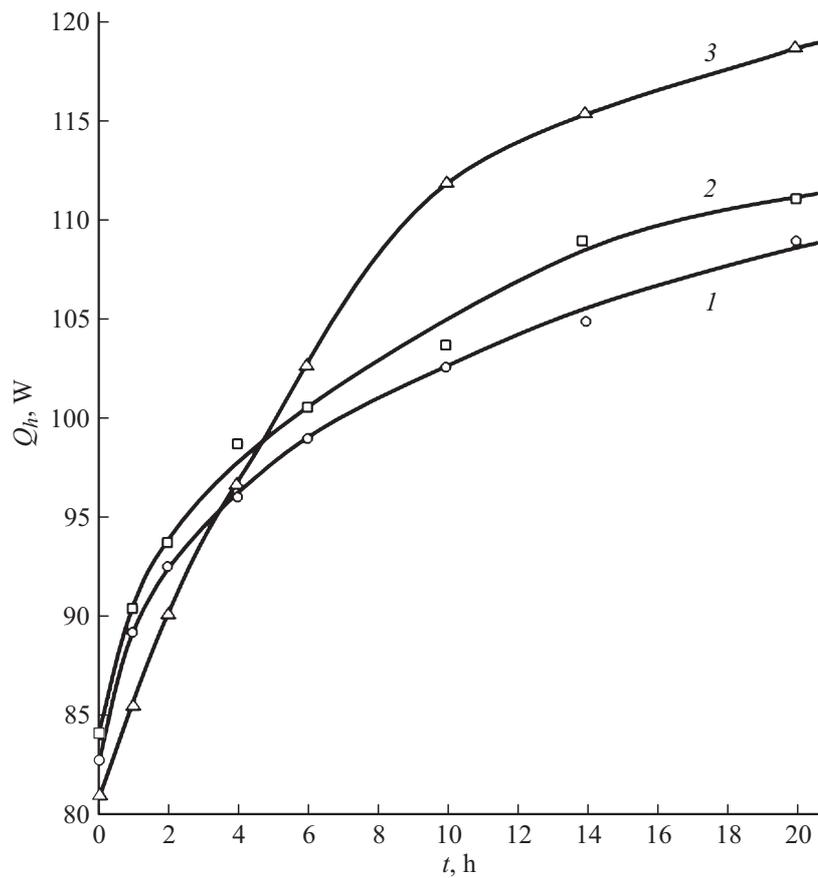


Рис. 1. Динамика кондуктивного теплового потока в зависимости от давления Ar. 1 — $1.33 \cdot 10^4$ Па, 2 — $2.67 \cdot 10^4$ Па, 3 — $2.67 \cdot 10^3$ Па.

зависимость $T(z, t)$ изменяется. Температура T_c и dT/dz в области опорного пятна разряда уменьшается, а на боковой поверхности электрода, наоборот, средний уровень $T(z)$ становится значительно выше (~ 400 К), что приводит к существенной перестройке температурного поля катода. В целом температурные измерения хорошо согласуются с данными по тепловым потокам.

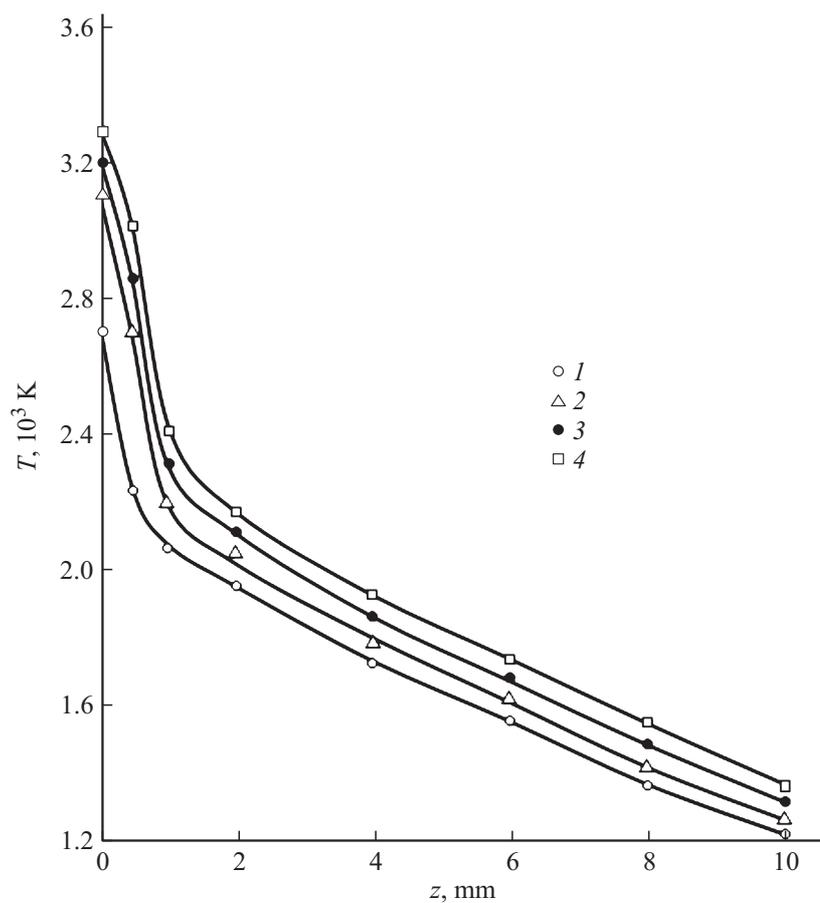


Рис. 2. Динамика температуры $T(z)$ катода. $p = 1.33 \cdot 10^4$ Pa, $I = 50$ A. $I - t = 0, 2 - 2, 3 - 10, 4 - 20$ h.

Основной интегральной характеристикой работоспособности термоэмиссионного катода является удельная эрозия G , которая определяется всей совокупностью сложных теплофизических процессов, протекающих внутри твердого тела, на его поверхности и в прикатодной зоне [1]. В [3] показано, что на активированных термоэмиссионных катодах

определяющим является испарительный механизм эрозии. Этот вывод подтверждается результатами, полученными в данной работе. На всех токовых режимах удельная эрозия катода растет со временем наработки. Заметный количественный рост $G(t)$ наблюдается после 6–10 h работы электрода. К этому времени значительно возрастают тепловой поток $Q_h(t)$ (рис. 1), температурное поле катода $T(z, t)$ (рис. 2) и соответственно увеличивается термическое испарение и эрозия катодного материала. На малых токовых нагрузках процесс эрозии усиливается более интенсивным обеднением активирующей присадки вследствие возрастания градиента температуры в области горячего торца катода [6]. Например, при $I = 20$ А впервые 10 h $G = 5 \cdot 10^{-11}$ kg/C, а в последующие 10 h испытаний возрастает до $8 \cdot 10^{-10}$ kg/C, т.е. увеличивается более чем на порядок.

Существенное влияние на эрозию электрода оказывает давление Ar. Функция $G(p)$ имеет ярко выраженный минимум, равный $6.4 \cdot 10^{-12}$ kg/C, при $p = 1.33 \cdot 10^4$ Pa на токовой нагрузке $I = 50$ А. Этот результат и графики тепловых параметров подтверждают измерения $e\varphi(z, p)$, проведенные в [5]. В данном случае реализуется оптимальный режим функционирования электродного узла с диффузной формой разряда, полностью охватывающей поверхность рабочего торца катода. Температурное поле с профилем $T(z)$ (рис. 2) обеспечивает динамическое равновесие между диффузионным потоком присадки из объема матрицы и ее испарением на активной зоне электрода. Подробнее закономерности этих процессов обсуждаются в [6]. Напряжение на дуге, измеренное по методике [7], составляет 15.6 V и остается постоянным в течение 20 h работы катода. С увеличением тока от 20 до 150 А при $p = 1.33 \cdot 10^4$ Pa оно уменьшается от 20.1 до 14.2 V.

Графики на рис. 3 иллюстрируют динамику функции $G(p, t)$ при понижении давления от $1.33 \cdot 10^4$ Pa (кривая 1) до $2.67 \cdot 10^3$ Pa (кривая 2). Значительное увеличение $G(p, t)$ при низком давлении связано с дальнейшим расширением катодной области дуги на цилиндрическую поверхность электрода, что приводит к общему росту температуры на боковой поверхности при некотором уменьшении T_c (~ 40 K). Однако за счет значительного увеличения активной зоны и соответственно площади испарения с достаточно высокой интегральной температурой $T \approx 2580$ K удельная эрозия катода в течение 20 h возрастает в 4.5 раза. Для анализа влияния материала электрода на его термическое состояние и эрозию при оптимальных условиях ($p = 1.33 \cdot 10^4$ Pa, $I = 50$ А) были исследованы зависимости $G(t)$ катодов одинаковых

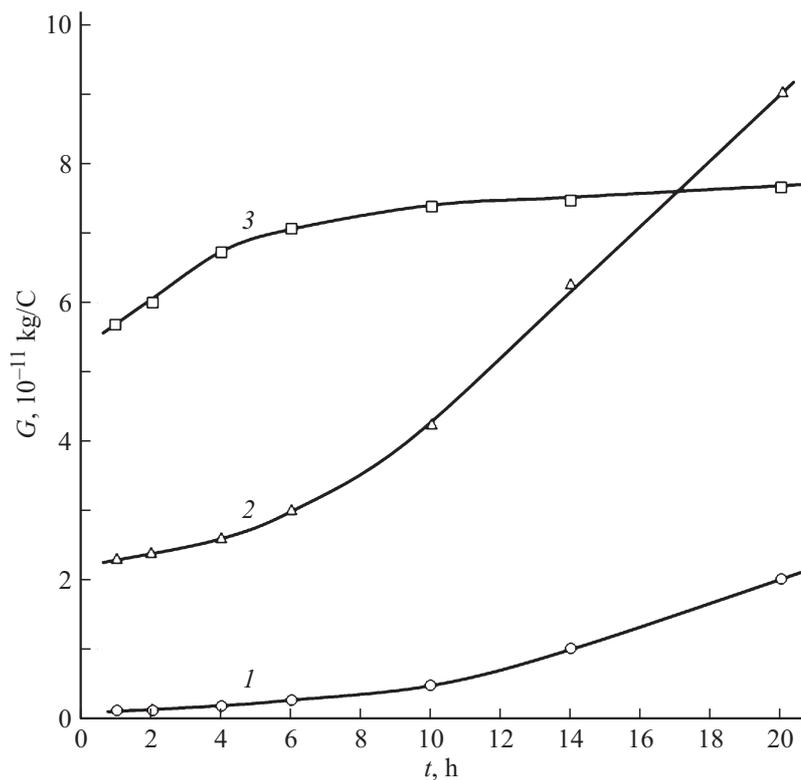


Рис. 3. Динамика удельной эрозии катодов в зависимости от давления Ar. $I = 50$ А. 1 — ВТ-15, $p = 1.33 \cdot 10^4$ Па; 2 — ВТ-15, $p = 2.67 \cdot 10^3$ Па; 3 — W, $p = 1.33 \cdot 10^4$ Па.

геометрических размеров из торированного вольфрама ВТ-15 (кривая 1) и чистого вольфрама (кривая 3). Удельная эрозия W-катода существенно выше и за 20 h испытаний остается практически неизменной на уровне $7 \cdot 10^{-11}$ kg/C, в то время как $G(t)$ активированного катода монотонно возрастает от $6 \cdot 10^{-12}$ kg/C до $2 \cdot 10^{-11}$ kg/C, что вызвано увеличением уровней $T(z)$ и $e\phi(z)$. Это свидетельствует о том, что эрозия электродов имеет термический характер, величина и динамика $G(p, t)$ на активированных катодах определяются в основном испарением присадки.

Таким образом, проведенные исследования динамики теплового состояния и удельной эрозии позволили установить влияние внешних параметров: тока дугового разряда, давления плазмообразующего газа и электродного материала на работоспособность термоэмиссионного катода. Полученные результаты позволяют оптимизировать функциональные характеристики стержневых термокатодов плазменных устройств в зависимости от рассмотренных внешних параметров.

Список литературы

- [1] Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
- [2] Fauchais P., Vardelle A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. N 6. P. 1258–1280.
- [3] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. Термоэмиссионные дуговые катоды. М.: Энергоиздат, 1988. 192 с.
- [4] Цыдыпов Б.Д. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С 88–94.
- [5] Цыдыпов Б.Д. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 4. С. 135–137.
- [6] Цыдыпов Б.Д., Симаков И.Г. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 11. С. 115–121.
- [7] Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. М.: Физматлит, 2008. 264 с.