

## Зависимости параметров термокатода от давления в стационарной аргоновой дуге

© Б.Д. Цыдыпов

Бурятский научный центр СО РАН,  
670047 Улан-Удэ, Россия  
E-mail: lmf@ofpsrv.bsc.buryatia.ru

(Поступило в Редакцию 24 июля 2006 г.)

Приведены первые экспериментальные данные влияния давления аргона на характеристики стержневого катода из торированного вольфрама в стационарном дуговом разряде. Измерены зависимости интегральных параметров катода: работа выхода электронов, температура, плотность тока и удельная эрозия при токовых нагрузках 20–150 А в диапазоне давлений  $2.66 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$  Па. Одновременное рассмотрение этих параметров дает достаточно полную информацию о режиме функционирования активированного электрода. Отмечено существенное влияние давления на уровень удельной эрозии катода.

PACS: 52.80.Mg

Термическое состояние и эрозионная стойкость катодов сильноточных плазменных систем определяют функциональные характеристики и ресурс их работы [1]. Наибольшая работоспособность катодов достигается в режиме термоэмиссии при использовании в качестве электродного материала тугоплавких металлов, активированных легирующими компонентами из окислов редкоземельных элементов [2]. Однако при длительном функционировании устройства в связи с испарением и в ряде случаев интенсивным выгоранием происходит обеднение рабочей поверхности электрода активатором, сопровождающееся увеличением работы выхода, температуры и, как следствие, его эрозии. На динамику этих процессов и соответственно интегральных параметров катода существенное влияние оказывают давление  $p$  и род плазмообразующего газа. Данная проблема для термокатодов из активированного вольфрама исследована достаточно подробно в диапазоне низких  $6.7 \cdot 10^2 - 1.6 \cdot 10^4$  и сверхвысоких  $1.10^5 - 5 \cdot 10^6$  Па давлений (см., например, обзоры в [1,3]). В то же время в области давлений  $1.6 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$  Па, рассматриваемых в данной работе, она практически не изучена.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, схематически представленном на рис. 1. В охлаждаемой водой вакуумной камере 4 с наполнением аргона между катодом 1 из торированного вольфрама ВТ-15 диаметром  $d = 4$  мм, длиной  $L = 20$  мм и анодом 2 из чистого поликристаллического вольфрама ( $d = 10$ ,  $L = 25$ ) инициировалась свободно горящая дуга 3. Рабочие торцы электродов заточены в виде полусфер. Давление среды и токовые нагрузки варьировались в пределах  $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$  Па и 20–150 А соответственно. Основная серия экспериментов проведена на рабочем токе  $I = 50$  А, так как на нем достигался наиболее благоприятный температурный режим катода.

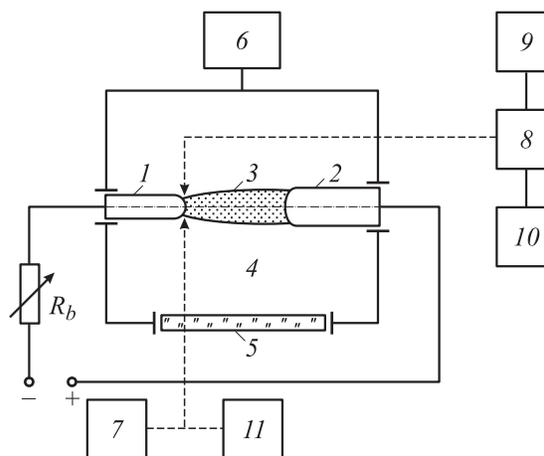
Температурный профиль катода измерялся оптическим микропирометром 7 с пространственным разреше-

нием 0.1 мм. Погрешность измерения составляла  $\sim 2\%$ . Одновременно с температурой определялась плотность тока методами светового диаметра и термоэлектронным (ТЕ) с использованием формулы Ричардсона-Дешмана.

Работа выхода электронов  $e\phi$  измерялась методом контактной разности потенциалов (КРП) на установке 8–10 и определялась по формуле

$$e\phi = e\phi_k \pm eV_k,$$

где  $e\phi_k$  — работа выхода эталонного электрода,  $V_k$  — контактная разность потенциалов. Погрешность измерения работы выхода не превышала 0.02 eV. Для измерений использовалась установка, аналогичная представленной в [4]. Эрозия электрода определялась взвешиванием на аналитических весах с погрешностью менее 3%.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — катод, 2 — анод, 3 — дуговой разряд, 4 — вакуумная камера, 5 — кварцевое окно, 6 — система вакуумирования и напуска газа, 7 — оптический микропирометр, 8 — блок для измерения работы выхода, 9 — звуковой генератор, 10–11 — осциллографы.

Измерения проводились следующим образом. Методом КРП определялся исходный профиль работы выхода  $e\varphi(z)$  по длине вылета катода из катододержателя с пространственным шагом 1 mm. Зажигался дуговой разряд при фиксированном давлении Ar и через определенный промежуток времени ( $\sim 10$  min) после установления стабильного стационарного режима работы катода, контролируемого калориметрическим и пирометрическим методами, измерялись профиль температуры катода  $T(z)$  и размер опорного пятна дуги. После этого ток отключался, катод снимался с держателя и определялись  $e\varphi(z)$  и эрозия электрода. Затем этот цикл повторялся для другого давления Ar на той же токовой нагрузке.

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие изменения  $e\varphi(z)$  катода в зависимости от давления аргона. По оси абсцисс интервал 0–2 mm занимает боковая проекция полусферического рабочего торца, 2–10 mm — цилиндрическая часть длины вылета электрода. Начальное распределение  $e\varphi(z)$  по всей поверхности катода равномерное и равно 2.92 eV. Из графиков видно, что после 10 min работы катода при силе тока  $I = 50$  A уровень  $e\varphi(z)$  повышается на всей его поверхности, что, очевидно, связано с испарением и обеднением активирующим элементом матрицы электрода. Обращает внимание то, что значения работы выхода в месте контакта дуги  $e\varphi_c$  значительно меньше, чем на периферии. При этом наиболее интенсивно обедняется торием область, непосредственно прилегающая к опорному пятну разряда. Этот экспериментальный факт подтверждает явление рециклинга атомов и ионов металла в прикатодной области стационарной дуги на термокатодах [3].

Измерения профиля температуры катода  $T(z)$  показали, что с ростом давления среды температура в

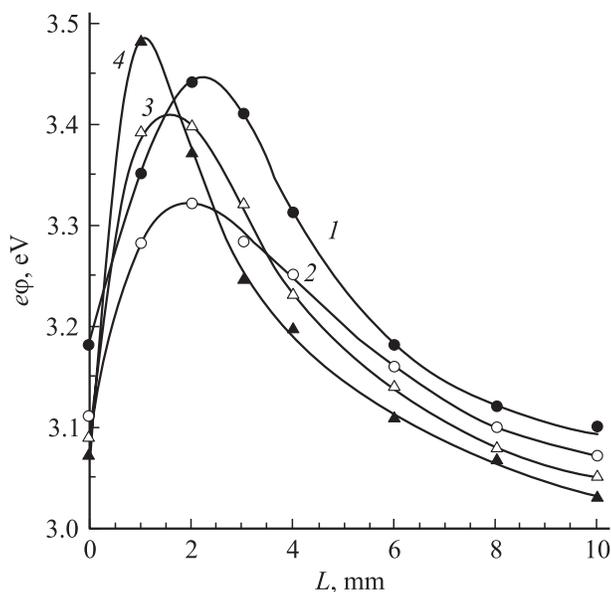


Рис. 2. Зависимости работы выхода катода от давления аргона,  $I = 50$  A; 1 — 2.66, 2 — 13.3, 3 — 53.2, 4 — 101.1 kPa.

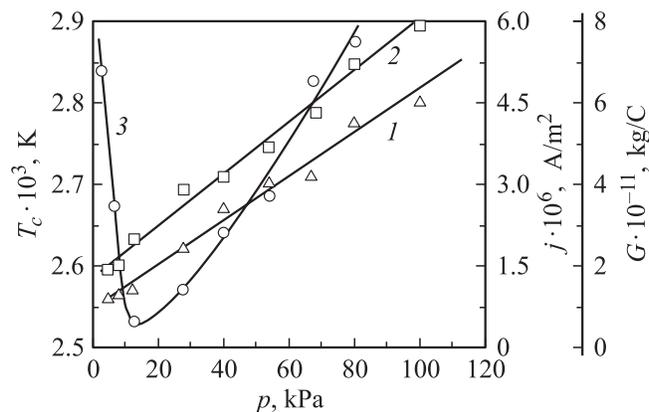


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры (1), плотности тока (2) и удельной эрозии (3) катода от давления аргона,  $I = 50$  A.

катодном пятне  $T_c$  увеличивается, а температура со стороны держателя уменьшается. В связи с этим градиент температуры по длине вылета  $dT/dz$  возрастает, особенно около опорного пятна дуги. Наибольший рост температурной зависимости  $T(p)$  наблюдается в центре пятна: при изменении  $p$  от  $2.66 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^5$  Pa максимальная температура  $T_c$  линейно растет от 2560 до 2800 K (рис. 3).

Плотность тока  $j$  также практически линейно растет с увеличением  $p$  во всем диапазоне исследования. Из рис. 3 видно, что  $j$  увеличивается почти в 5 раз от  $1.37 \cdot 10^6$  до  $5.94 \cdot 10^6$  A/m<sup>2</sup>. Такие же линейные зависимости вида  $j(p) = C \cdot p$  ( $C = \text{const}$ ) в среде Ar наблюдались в узком диапазоне низких давлений [5] и давлениях выше атмосферного в H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и He [6].

Удельная эрозия  $G$  в отличие от  $T_c$  и  $j$  имеет ярко выраженный минимум в зависимости  $G(p)$  (рис. 3). При понижении давления Ar от нормального до  $1.33 \cdot 10^4$  Pa удельная эрозия катода уменьшается от  $1.13 \cdot 10^{-10}$  до минимальной величины  $6.4 \cdot 10^{-12}$  kg/C, затем в малом диапазоне  $1.33 \cdot 10^4$ – $2.66 \cdot 10^3$  Pa резко возрастает до  $6.8 \cdot 10^{-11}$  kg/C. Ранее подобная U-образная кривая  $G(p)$  зафиксирована на медном катоде в импульсном дуговом разряде [7].

Дуговой разряд высокого давления ( $p \geq 10^5$  Pa) в инертных газах на стержневых тугоплавких катодах представляет собой примерно однородное плазменное образование колоколообразной формы [8]. Феноменологически с понижением давления характер разряда постепенно изменяется, происходит общее расширение плазмы и образование шаровой катодной зоны, четко выделяющейся на фоне столба дуги [5]. При этом изменяются параметры прикатодной плазмы и энергообмен на поверхности металла, что приводит к существенному изменению теплового состояния и интегральных характеристик электрода. При постоянной токовой нагрузке увеличение площади привязки разряда ведет к уменьшению значений  $j$ ,  $T_c$  и соответствен-

но  $G$  (рис. 3). Температурный профиль становится более пологим, но повышается средний уровень  $T(z)$ . Такая трансформация температурного поля катода отражается на профиле  $e\varphi(z)$  (рис. 2). Вне привязки разряда с повышением температуры  $e\varphi$  растет за счет более быстрого обеднения поверхности катода торием (температура испарения Th существенно ниже температуры испарения W). Другая картина наблюдается в катодном пятне, где при максимальной температуре  $T_c = 2800$  К ( $p = 10^5$  Па)  $e\varphi_c = 3.07$  eV, а при 2560 К ( $p = 2.66$  kPa)  $e\varphi_c = 3.18$ . Последнее связано с тем, что при низких давлениях увеличивается глубина диффузии тяжелых частиц в плазму и снижается эффективность механизма рециклинга [9]. В условиях данного эксперимента при  $p \approx 1.5 \cdot 10^4$  Па размеры катодной области и привязки разряда к электроду сильно увеличиваются, полностью охватывая всю его торцевую часть, и реализуется ярко выраженная диффузная форма дуги с оптимальным температурным режимом и минимальными уровнями  $e\varphi(z)$  и  $G$  (рис. 2, кривая 2; рис. 3, кривая 3). При  $p < 1.5 \cdot 10^4$  Па катодная область дуги еще больше расширяется и распространяется уже на цилиндрическую поверхность электрода, что приводит к возрастанию профиля температуры на боковой поверхности, а также некоторому уменьшению  $T_c$  и  $j$  на катоде. Однако за счет существенного увеличения активной зоны катода и соответственно площади испарения с достаточно высокой интегральной температурой  $T \sim 2580$  К удельная эрозия начинает резко расти: при уменьшении  $p$  в 4 раза уровень  $G$  повышается почти на порядок. Дальнейшее уменьшение давления ( $p < 1.33 \cdot 10^3$  Па) приводит к режиму горения разряда с неустойчивой привязкой к электроду, а затем и к срыву дуги. Граничное давление  $p_{кр}$ , при котором образуются нестационарные пятна, в зависимости от тока дуги находится в области  $(1.33-2) \cdot 10^3$  Па, что согласуется с теоретическими оценками [10].

Удельная эрозия  $G$  является важнейшей интегральной характеристикой, определяющей стойкость и ресурс катода. Поэтому практический интерес вызывает минимум в зависимости  $G(p)$ , свидетельствующий о том, что наряду с оптимальными токовой нагрузкой и геометрическими размерами [1,3,10] существует оптимальное давление газа  $p_{орт}$  с наименьшей эрозией катода. Видимому, для каждого конкретного режима функционирования (геометрия и материал, условия теплообмена, рабочий ток, род газа) можно определить  $p_{орт}$ . Этот вопрос требует дальнейших более детальных исследований в различных газах в широком диапазоне изменения давления и токовой нагрузки электродов.

Таким образом, в работе впервые получены зависимости комплекса основных параметров активированного термокатода  $e\varphi(z)$ ,  $T(z)$ ,  $j$ ,  $G$  от давления Ar в области  $2.66 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$  Па. Измерения  $e\varphi(z)$  подтвердили существование рециклинга атомов и ионов металла в прикатодной области дугового разряда. Показано, что зависимости  $T_c(p)$  и  $j(p)$  носят линейный характер, а

в распределении  $G(p)$  имеется глубокий минимум при  $p \sim 1.33 \cdot 10^4$  Па. Существование данного минимума дает возможность оптимизации ресурса катода по уровню эрозии от давления среды.

## Список литературы

- [1] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. Термоэмиссионные дуговые катоды. М.: Энергоиздат, 1988. 192 с.
- [2] Амосов В.М., Карелин Б.А., Кубышкин В.В. Электродные материалы на основе тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1976. 224 с.
- [3] Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
- [4] Савицкий Е.М., Буров И.В., Корольков В.А. и др. // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 2. С. 121–123.
- [5] Hugel H., Krulle G. // Beitr. Plasmaphys. 1969. Bd 9. N 2. S. 87–116.
- [6] Вертипрахов А.И., Захаркин Р.Я., Кучеров Я.Р. и др. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1988. № 1. Вып. 3. С. 53–56.
- [7] Раховский В.И. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1975. № 3. Вып. 1. С. 11–27.
- [8] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [9] Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Гужков В.В. и др. // ДАН СССР. 1981. Т. 260. № 6. С. 1354–1356.
- [10] Зимин А.М., Назаренко И.П., Паневин И.Г. и др. Математическое моделирование катодных процессов. Новосибирск: Наука, 1993. 194 с.