

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%.

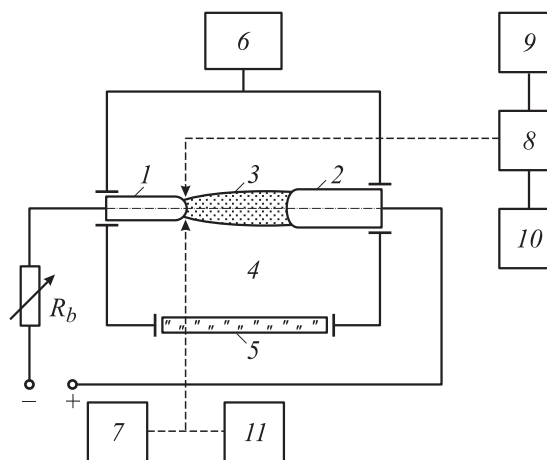


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — катод, 2 — анод, 3 — дуговой разряд, 4 — вакуумная камера, 5 — кварцевое окно, 6 — система вакуумирования и напуска газа, 7 — оптический микропирометр, 8 — блок для измерения работы выхода, 9 — звуковой генератор, 10–11 — осциллографы.

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 (~ 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

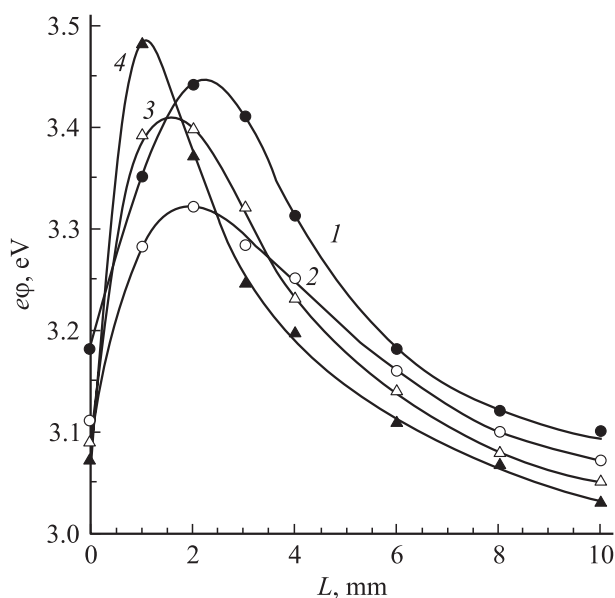


Рис. 2. Зависимости работы выхода катода от давления аргона, $I = 50$ A; 1 — 2.66, 2 — 13.3, 3 — 53.2, 4 — 101.1 kPa.

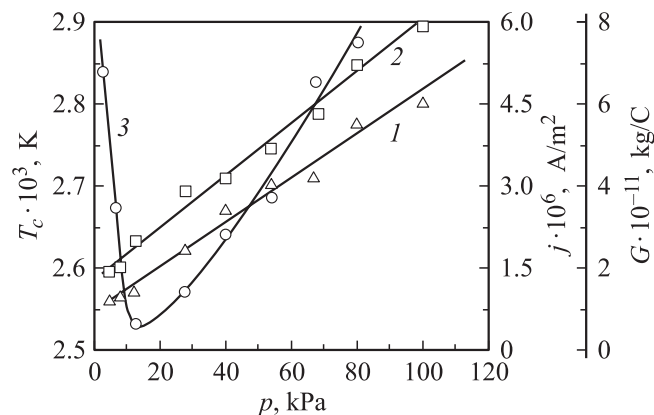


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры (1), плотности тока (2) и удельной эрозии (3) катода от давления аргона, $I = 50$ A.

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/m². 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 H₂, N₂ 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.