

УДК 537.523.5

## Исследование аргоновой плазмы дугового разряда с катодом из чистого вольфрама

М. Х. Гаджиев, М. А. Саргсян, Д. В. Терешонок, А. С. Тюфтяев

*В работе исследуется диффузионный режим привязки электрической дуги постоянного тока в среде аргона атмосферного давления к катоду из чистого вольфрама в виде конуса с углом при вершине 60°. Проведено сравнение результатов эксперимента с данными других исследований по дуговым разрядам, где в качестве катодов применялся лантанированный (W-2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или торированный (W-2% ThO<sub>2</sub>) вольфрам. В результате экспериментальных исследований при силе тока 200 А получены следующие значения максимальной температуры на оси разряда, концентрации электронов и максимальной температуры поверхности катода:  $T_e = 2,6$  эВ,  $n_e = 1,5 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, 3800 К соответственно. Результаты сравнения параметров плазмы вблизи острия катода и температуры поверхности электрода в месте привязки дуги могут быть использованы при разработке оборудования и технологий с применением электродуговых разрядов.*

PACS: 52.50.Nr

*Ключевые слова:* плазма, дуговой разряд, вольфрам, эксперимент/

### Введение

Дуговые разряды имеют широкое применение в металлургическом оборудовании, сварочных аппаратах, плазмотронах и т. д. За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в моделировании дуговых разрядов при высоких давлениях, что позволило понять основные механизмы привязки дуги к катоду [1—3], которая осуществляется в основном двумя режимами, а именно, диффузионным режимом и режимом катодных пятен. Диффузионный режим характеризуется сравнительно равномерным распределением плотности тока по поверхности электрода, что обеспечивает равномерный нагрев электрода, и можно говорить о термокатоде [4]. Для режима катодных пятен характерны относительно большие плотно-

сти тока, протекающего через малую или несколько малых областей поверхности электрода. В этом случае принято говорить о дугах с холодным катодом [4].

Понимание приэлектродных процессов является необходимым условием для минимизации эрозии электродов и повышения ресурса оборудования промышленных установок. Одним из основных методов исследования катода является измерение температуры поверхности в процессе горения дуги [5—7]. Очевидно, что при более низкой температуре поверхности электрода уменьшаются термонапряжения, а это способствует более длительному использованию катода в установках. В связи с этим для изготовления катодов широко применяется лантанированный (W-2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или торированный (W-2% ThO<sub>2</sub>) вольфрам [8—10]. В этом случае уменьшается работа выхода, что дает возможность получить необходимый ток термоэмиссии при более низкой температуре поверхности. В работе [8] было показано, что температура как плазмы, так и катода в сильной степени зависит от формы поверхности электрода.

В исследованиях [11, 12] для определения доли тока термоэмиссии вольфрамового катода в инертном газе при дуговом разряде была получена аномально высокая эмиссия электронов.

На основании большого количества экспериментальных данных за последнее десятилетие

---

Гаджиев Махач Хайрудинович, зав. лабораторией.  
 Саргсян Микаэль Арменович, аспирант.  
 Терешонок Дмитрий виковрович, зав. лабораторией.  
 Тюфтяев Александр Семенович, зав. отделом.  
 Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН).  
 Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.  
 Тел. +7 (495) 485-96-66.  
 E-mail: tereshonokd@gmail.com

Статья поступила в редакцию 2 июня 2016 г.

---

© Гаджиев М. Х., Саргсян М. А., Терешонок Д. В., Тюфтяев А. С., 2016

появилось много расчетно-теоретических работ по построению теории привязки дуг к электроду, а также моделированию плазмохимических процессов с учетом относительно больших тепловых потоков [13—16].

Целью данной работы являлось расширенное исследование диффузионного режима привязки электрической дуги постоянного тока в среде аргона атмосферного давления к катоду из чистого вольфрама в виде конуса с углом при вершине  $60^\circ$ , что, в частности, позволит провести сравнение результатов эксперимента с данными других исследований по дуговым разрядам, где в качестве катодов применялся лантанированный или торированный вольфрам. В конечном итоге, выводы работы могут быть использованы для повышения эффективности оборудования и технологий с применением электродуговых разрядов.

### Измерение температуры плазмы и концентрации электронов

В работе использовался плазмотрон постоянного тока с расширяющимся каналом анода и вихревым стабилизатором дуги [10, 19].

Плазмотрон состоит из трех секций. Первая представляет собой медную водоохлаждаемую обойму с катодом в виде конуса с углом при вершине  $60^\circ$ , выполненного из спеченного вольфрамового прутка диаметром 5 мм. Стоит отметить, что при данном значении угла конуса достигается максимальная температура плазмы вблизи острого катода из торированного вольфрама (W-2% ThO<sub>2</sub>) [8]. Вторая секция представлена водоохлаждаемым электроизолированным от анода и катода соплом, имеющим два смотровых окна для наблюдений за состоянием катода и прикатодной плазмой. Третья секция является медным анодом с расширяющимся внутренним разрядным каналом. Длина дуги при работе плазмотрона с силой тока 200 А и расходе аргона 1,5 г/с составляет 1—1,5 см при диаметре дуги 2 мм.

Диагностика, как и в работе [17], велась в двух направлениях, а именно, спектроскопия прикатодной плазмы и видео-термометрия поверхности катода.

Схема всей экспериментальной установки представлена на рис. 1. С одного из смотровых окон резкое изображение проецировалось объективом «Гелиос-40-2» на матрицу высокоскоростной, черно-белой камеры Phantom Miro M110. С противоположного окна изображение дуги проецировалось (с использованием кварцевой линзы с фокусным расстоянием 220 мм) на входную щель спектрографа ДФС-452. На выходе из спектро-

графа находилась высокочувствительная матрица Andor.

Плазмотрон перемещался вдоль оси катода с шагом 0,1 мм, что позволило снять спектры плазмы на разном расстоянии от катода.

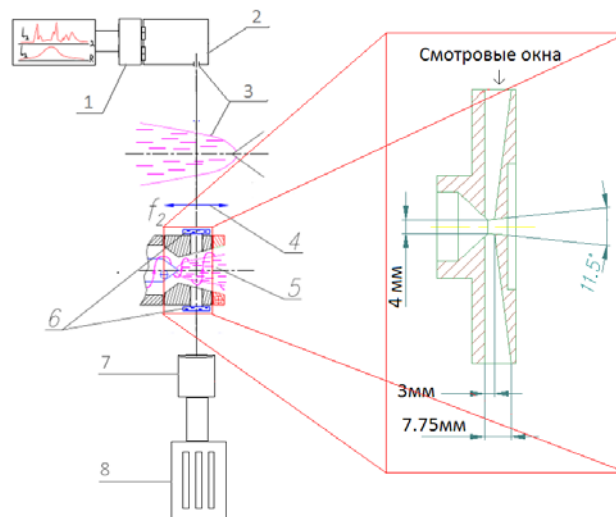


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — матрица Andor, 2 — спектрограф ДФС-452, 3 — резкое изображение дуги проецируемое на входную щель спектрографа, 4 — фокусирующая линза, 5 — плазменный инур, 6 — смотровые окна, 7 — объектив «Гелиос-40-2», 8 — высокоскоростная камера Phantom Miro M110.

Температура электронов рассчитывалась методом относительных интенсивностей линий частиц разной кратности ионизации Ar II и Ar III в спектральной области  $327\div 370$  нм. Максимальное значение температуры электронов на оси дугового разряда составило  $T_e = 2,6$  эВ.

Концентрация электронов измерялась по штарковскому уширению спектральных линий Ar II 363,79 нм и Ar II 329,36 нм, которая позже сравнивалась с уширением линий из работ Конжевика [18] и составила  $n_e = 1,5 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

### Применимость спектральных измерений

Для применения метода относительных интенсивностей линий частиц разной кратности ионизации при измерении температуры плазмы необходимо выполнения условия локального термодинамического равновесия (ЛТР). В этом случае для температуры  $T_e = 2,6$  эВ расчеты по формуле Саха дают многокомпонентный состав плазмы со следующими значениями концентрации электронов, однократно-, двукратно-, и трехкратно-ионизированных ионов и нейтральных атомов:  $n_e = 1,6 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $n_i^+ = 1,1 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $n_i^{2+} = 7,3 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $n_i^{3+} = 7,3 \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>,  $N = 5 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

Частота рождения электронов определяется следующим соотношением:

$$v_i \equiv k_{oi}N + k_{1i}n_i^+ + k_{2i}n_i^{2+}.$$

В соответствии с [20], для аргона получаем следующие значения в единицах 1/с:

$$\begin{aligned} k_{oi}N &\sim 3 \times 10^{-10} \times 5 \times 10^{12} = 1,5 \times 10^3 \\ k_{1i}n_i^+ &\sim 0,7 \times 10^{-10} \times 1,1 \times 10^{16} = 0,77 \times 10^6 \\ k_{2i}n_i^{2+} &\sim 3 \times 10^{-12} \times 7,3 \times 10^{16} = 0,22 \times 10^6. \end{aligned}$$

Таким образом, наибольший вклад в ионизацию в наших условиях дает реакция с участием однократно ионизированных атомов.

Радиус Дебая при таких параметрах плазмы составляет  $r_D \approx 1,75 \times 10^{-6}$  см. Длину ионизации определяется из соотношения:

$$d = \sqrt{D_{1i}\tau_{ion}},$$

где  $D_{1i}$  — коэффициент диффузии иона аргона  $Ar^+$ ,  $\tau_{ion} \sim 1/k_{1i}n_e$  — время ионизации. Значение  $D_{1i}$  в смеси определим по формуле из [21] (ввиду малой концентрации  $n_i^{3+}$  и  $N$  столкновения с  $Ar^{3+}$  и  $Ar$  во внимание не принимаются):

$$D_{1i} = \left( \frac{n_e}{nD_{ei}} + \frac{n_i^+}{nD_{ii}} + \frac{n_i^{2+}}{nD_{i2i}} \right)^{-1},$$

где  $D_{ei}$  — коэффициент диффузии иона аргона  $Ar^+$  в электронном газе,  $D_{ii}$  — коэффициент диффузии  $Ar^+$  в однократно ионизированном газе,  $D_{e2i}$  — коэффициент диффузии  $Ar^+$  в собственном двукратно ионизированном газе,  $n = n_e + n_i^+ + n_i^{2+}$ . С учетом наших экспериментальных данных получим для длины ионизации  $d \approx 1,6 \times 10^{-3}$  см.

Длину энергетической релаксации электронов  $\lambda_u$  в результате упругих соударений с тяжелыми частицами найдем аналогичным образом:

$$\lambda_u = \sqrt{D_e\tau_e},$$

где  $D_e = \left( \frac{n_e}{nD_{ee}} + \frac{n_i^+}{nD_{ei}} + \frac{n_i^{2+}}{nD_{e2i}} \right)^{-1}$  — коэффициент

диффузии электронов в смеси,  $D_{ee}$  — коэффициент диффузии электронов в электронном газе,  $D_{ei}$  — коэффициент диффузии электронов в однократно ионизированном газе,  $D_{e2i}$  — коэффициент диффузии электронов в двукратно ионизированном газе,  $\tau_e \approx \tau \frac{M}{2m_e}$  — время энергетической релаксации,  $\tau = \frac{\lambda_h}{u}$  — время между упругими

соударениями электрона с тяжелыми частицами,  $\lambda_h = \left( \frac{1}{\lambda_{ei}} + \frac{1}{\lambda_{e2i}} \right)^{-1}$  — длина пробега электрона [21],  $u$  — тепловая скорость электрона.

Таким образом, на основании наших экспериментальных данных значение энергетической релаксации электрона  $\lambda_u \approx 12 \times 10^{-3}$  см.

Соотношение между радиусом Дебая, длиной ионизации и энергетической релаксации электронов дается следующим неравенством:

$$r_D \ll \lambda_u \sim d,$$

что дает возможность применить упомянутое условие локального термодинамического равновесия.

### Измерение температуры поверхности катода

Применение камеры Phantom Miro M110 в качестве быстродействующего микропирометра с пространственным разрешением 25 мкм [19] позволяет получить видеogramмы свечения катода и определить поля температуры на его поверхности (см. рис. 2). Чтобы вырезать свечение дуги, перед объективом камеры устанавливался интерференционный фильтр с пропускной длиной волны 589 нм. Калибровка яркости производилась с помощью эталонной вольфрамовой лампы с яркостной температурой в 2400 К. Максимальная зарегистрированная температура на поверхности катода равнялась 3800 К. На видеосъемке отчетливо было видно изменение формы острия катода при наличие жидкой фазы, что косвенно подтверждает правильность измерения (температура плавления вольфрама 3695 К).

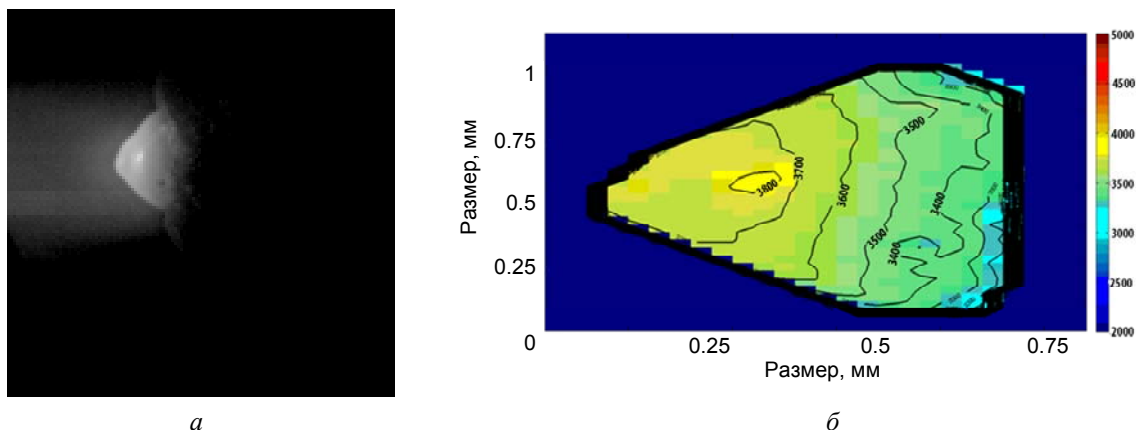


Рис. 2. Изображение катода при работе плазмотрона (а), термограмма полей температур на поверхности катода (в Кельвинах) (б).

### Обсуждение результатов

Температура плазмы положительного столба ( $T_e = 2,6$  эВ) в нашем эксперименте с чистым вольфрамом оказалось значительно выше, чем (при тех же электрических параметрах дугового разряда) для лантанированного катода (W-2%  $La_2O_3$ )  $T_e = 2$  эВ [10], которая практически совпадает с измерениями для торированного катода (W-2%  $ThO_2$ ) [8]. Стоит отметить, что для аргоновой дуги атмосферного давления с током 200 А и катодом из чистого вольфрама была получена близкая температура поверхности 3800 К, как и в работе [9] для торированного катода (W-2%  $ThO_2$ ), в то время как в работе [10] для лантанированного катода (W-2%  $La_2O_3$ ) максимальная температура была меньше и составляла 3100 К. Данное обстоятельство, по всей видимости, связано с тем, что эффективная работа выхода у лантанированного вольфрама значительно меньше, чем у торированного.

Различие в значениях для концентрации электронов между экспериментом и расчетом по Саха составляет не более 10 %, что косвенно подтверждает наличие ЛТР и обоснованность применения метода относительных интенсивностей для измерения температуры плазмы.

Как уже было отмечено, максимальная температура плазмы вблизи острия достигается при угле конуса катода  $60^\circ$ , а минимальная температура поверхности получилась у лантанированного вольфрама (W-2%  $La_2O_3$ ), что может быть использовано при разработке более эффективного оборудования и технологий с применением электродуговых разрядов.

### Заключение

Представлены результаты измерения концентрации электронов, температуры плазмы дуги

положительного столба и температурного поля поверхности катода дугового разряда в аргоне атмосферного давления с током 200 А и вольфрамовым катодом. Показана обоснованность применения метода относительных интенсивностей для измерения температуры плазмы.

В результате экспериментальных исследований при силе тока 200 А получены следующие значения максимальной температуры на оси разряда, концентрации электронов и максимальной температуры поверхности катода:  $T_e = 2,6$  эВ,  $n_e = 1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , 3800 К соответственно.

На основании сравнения полученных результатов с данными других работ указаны особенности параметров разряда, которые могут быть использованы при разработке электродуговых технологий.

*Экспериментальная часть работы выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-08-00404. Расчетно-теоретическая часть выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам № СП-3812.2016.1.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gleizes A. // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. Vol. 35. P. 455.
2. Murphy A. B. // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. Vol. 35. P. 471.
3. Benilov M. S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. No. 14. P. 144001.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.
5. Пустогаров А. В., Колесниченко А. Н., Гаврюшенко Б. С. Захаркин Р. Я., Драган В. Д. // ТВТ. 1973. Т. 11. № 11. С. 174.
6. Haidar J. and Farmer A. J. D. // Review of Scientific Instruments. 1993. Vol. 64. P. 542.
7. Haidar J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. P. 2494.

8. Haidar J. and Farmer A. J. D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. Vol. 27. P. 555.
9. Sillero J. A., Ortega D., Munoz-Serrano E. and Casado E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 185204.
10. Gadzhiev M. Kh., Sargsyan M. A., Tereshonok D. V. and Tyuftyaev A. S. // EPL. 2015. Vol. 111. P. 25001.
11. Дороднов А. М., Козлов Н. П., Помелов Я. А. // ТВТ. 1971. Т. 9. № 3. С. 483.
12. Дороднов А. М., Козлов Н. П., Помелов Я. А. // ТВТ. 1973. Т. 11. № 4. С. 724.
13. Цыдыпов Б. Д. // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 2. С. 269.
14. Полищук В. П. // ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 11.
15. Benilov M. S., Carpaij M. and Cunha M. D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. Vol. 39. P. 2124.
16. Ortega D., Sillero Marin J. A., Munoz-Serrano E. and Casado E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 085202.
17. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. — М.: Мир, 1971.
18. Konjevic N., Lesage A., Fuhr J. R. and Wiese W. L. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. Vol. 31. No. 3. P. 819.
19. Горячев С. В., Исакаев Э. Х., Мясников М. И., Чиннов В. Ф. // ТВТ. 2008. Т. 46. № 6. С. 820.
20. Almeida R. M. S., Benilov M. S. and Naidis G. V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. P. 960.
21. Benilov M. S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. P. 1683.

## Study of an arc discharge argon plasma from a pure tungsten cathode

M. Kh. Gadzhiev, M. A. Sargsyan, D. V. Tereshonok, and A. S. Tyuftyaev

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: tereshonokd@gmail.com

Received June 2, 2016

***In our work, the diffuse mode of the argon atmospheric arc binding to the conical tungsten cathode with a top angle of 60° is investigated. Results of our experiment have been compared with the results of other authors where cathode is made from lanthanated tungsten (W-2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and thoriated tungsten (W-2% ThO<sub>2</sub>). Using the pure tungsten cathode operated at current of 200 A in atmospheric pressure provides following results — the maximum electron temperature on the discharge axis is  $T_e = 2.6$  eV, electron concentration is  $n_e = 1.5 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> and the maximum surface cathode temperature is 3800 K. Results of the comparison of plasma parameters near the cathode tip and electrode temperature can be used for recommendations on production of installations in which arc discharges are applied.***

PACS: 52.50.Nr

*Keywords:* plasma, arc discharge, tungsten. experiment.

### REFERENCES

1. A. Gleizes, Plasma Chem. Plasma Process. **35**, 455 (2015).
2. A. B. Murphy, Plasma Chem. Plasma Process. **35**, 471 (2015).
3. M. S. Benilov, J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 144001 (2008).
4. Yu. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Springer, New York, 1997; Nauka, Moscow, 1987).
5. A. V. Pustogarov, A. N. Kolesnichenko, B. S. Gavrusenko, R. Ya. Zakharkin, and V. D. Dragan, High Temperature **11** (11), 174 (1973).
6. J. Haidar and A. J. D. Farmer, Review of Scientific Instruments. **64**, 542 (1993).
7. Haidar J., J. Phys. D: Appl. Phys. **28**, 2494 (1995).
8. J. Haidar and A. J. D. Farmer, J. Phys. D: Appl. Phys. **27**, 555 (1994).
9. J. A. Sillero, D. Ortega, E. Munoz-Serrano and E. Casado, and J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 185204 (2010).
10. M. Kh. Gadzhiev, M. A. Sargsyan, D. V. Tereshonok and A. S. Tyuftyaev, EPL. **111**, 25001 (2015).
11. A. M. Dorodnov, N. P. Kozlov, and Ya. A. Pomelov, High Temperature. **9** (3), 483 (1971).
12. A. M. Dorodnov, N. P. Kozlov, and Ya. A. Pomelov, High Temperature. **11** (4), 724 (1973).
13. B. D. Tsydyпов, Thermophysics and Aeromechanics, **14**, 257 (2007).
14. V. P. Polistchook, High Temperature. **43** (1), 11. (2005).
15. M. S. Benilov, M. Carpaij and M. D. Cunha, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, 2124 (2006).
16. D. Ortega, J. A. Sillero Marin, E. Munoz-Serrano and E. Casado, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 085202 (2009).
17. V. Lohte-Holtgreven, *The Methods of Plasma Investigation* (Mir, Moscow, 1971) [in Russian].
18. N. Konjevic, A. Lesage, J. R. Fuhr and W. L., J. Phys. Chem. Ref. Data. **31**, 819 (2002).
19. S. Goryachev, E. Isakaev, M. Myasnikov and V. Chinnov, High Temperature. **46** (6), 752 (2008).
20. R. M. S. Almeida, M. S. Benilov and G. V. Naidis, J. Phys. D: Appl. Phys. **33**, 960 (2000).
21. M. S. Benilov, J. Phys. D: Appl. Phys. **33**, 1683 (2000).