

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ МЕТАЛЛОВ

Г.В. Марков, А.П. Ралько, Ж.Е. Макарова, Н.Ю. Мельник

Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

Построена модель теплопереноса в области катодного пятна вакуумной дуги чистых металлов и получены аналитические выражения, определяющие его радиус и температуру. Рассчитаны значения радиуса катодного пятна для некоторых металлов.

Ключевые слова: Вакуум, катодное пятно, металлы

THE CHARACTERISTICS OF CATHODE SPOT OF VACUUM ARC OF METALS

G.V. Markov, A.P. Ralko, Zh.E. Makarova, N.Y. Melnik

The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

A model of heat transfer in the region of the cathode spot of a vacuum arc of pure metals is constructed and analytical expressions determining its radius and temperature are obtained. The values of the radius of the cathode spot for some metals

Keywords: Vacuum, cathode spot, metals

E-mail: volochkoat@mail.ru, mzhe_miam@tut.by

Введение

Среди получивших широкое распространение ионно-плазменных методов нанесения покрытий различного функционального назначения особенно выделяется вакуумный электродуговой или метод КИБ, позволяющий наносить покрытия из нитридов, карбидов, металлов, сплавов, композиционные, многослойные и т.д. В этом методе, в основном, покрытие формирует поток положительных ионов, поставщиком которых является катодное пятно вакуумной дуги. Вакуумная дуга представляет собой инструмент переноса электрического тока в вакууме между катодом и анодом [1–9], когда между ними имеется некоторая разность потенциалов $U=U_k+U_a$, где U_k – катодное падение потенциала, U_a – анодное падение потенциала. Обычно $U\sim 10\text{--}30$ В и $U_k\sim 10\text{--}30$ В, а $U_a\sim 0,5\text{--}1,0$ В [2]. Чисто визуально катодное пятно воспринимается как ярко светящаяся точка диаметром 50–500 мкм, перемещающаяся по поверхности катода.

Классическая картина физических процессов, происходящих в катодном пятне вакуумной дуги металлов и сплавов [10] в установившемся режиме, включает в себя

испарение атомов металла с поверхности катода, температура которой близка к температуре кипения T_k металла, и термоавтоэлектронную эмиссию электронов той же поверхности. Далее идут разлет пара и ускорение электронов в электрическом поле U_k . На некотором расстоянии от поверхности испарения электроны, ускоренные электрическим полем U_k , начинают эффективно ионизировать испарившиеся атомы, в результате чего, над поверхностью испарения образуется плазменное облако из положительных ионов и электронов по степени ионизации 0,5–0,95, которое и наблюдается как ярко светящаяся точка на поверхности катода. В образовавшемся плазменном облаке большая часть положительных ионов под действием поля U_k возвращается на поверхность катода в катодном пятне [6], тем самым разогревая поверхность до температур близких к температуре кипения металла и поддерживая разряд в целом. Меньшая часть положительных ионов под действием электронов, вытесняемых полем U_k от поверхности катода, покидает плазменное облако и распространяется в объём вакуумной камеры, приобретая за счет газодинамического ускорения [8] энергии порядка 10–120 эВ [1,5,9], что значительно превышает величину eU_k [3], где e – заряд электрона.

Теоретический анализ процессов теплопереноса

Одними из главных характеристик катодного пятна вакуумной дуги металлов является радиус катодного пятна R_k и температура поверхности T_k в катодном пятне. Это обусловлено тем, что именно эти характеристики определяют количество и размер микрокапель [1] в вакуумном электродуговом методе нанесения покрытий. Обычно радиус катодного пятна мал по сравнению с характерным размером самого катода и R_k изменяется в интервале 30–500 мкм. Расстояние между нижней частью плазменного облака и поверхностью катода не превышает 10–20 мкм. Отсюда следует, что при описании распределения температуры на поверхности и в объеме катода, когда на поверхность размером $2R_k$ в катодном пятне падает тепловой поток q , в стационарном режиме можно использовать уравнение теплопроводности

$$\Delta T = 0 \quad (1)$$

в цилиндрических координатах (z, r) – и граничными условиями на поверхности

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, 0) = \begin{cases} \frac{q}{\lambda}, r \leq R_k; \\ 0, r > R_k \end{cases} \quad (2)$$

где z – осевая координата, r – радиус-вектор поверхности катода, λ – коэффициент теплопроводности металла катода, который будем считать не зависящим от температуры. При этом принято, что катод занимает полупространство $z < 0$ и его поверхность расположена в плоскости $z = 0$. Тогда граничные условия при $r \rightarrow \infty$ и $z \rightarrow \infty$ можно задать в виде

$$T(\infty, z) = T_c, T(r, -\infty) = T_c, \quad (3)$$

где T_c – температура на внешней поверхности катода.

Охлаждение катода в катодном пятне, обусловленном тепловым излучением с поверхности, будем считать несущественным и не принимать его во внимание.

Решение уравнения (1), удовлетворяющее условиям (2) и (3), можно представить в виде разложения по собственным функциям оператора Лапласа [11]:

$$T = T_c + \int_0^{\infty} A(p) p J_0(r_p) \exp(z_p) dp, \quad (4)$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Подставляя это выражение в граничные условия (2) и используя формулу для обратного преобразования Хенкеля [11], можно найти функцию $A(\rho)$. В результате выражение (4), описывающее распределение температуры в объеме катода, принимает вид

$$T(r, z) = T_c + \frac{qR_k}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{J_1(r_p)}{\rho} J_0(r_p) \exp(z_p) dp. \quad (5)$$

Из (5) следует, что температура поверхности в катодном пятне определяется соотношением

$$T(r, 0) = T_c + \frac{qR_k}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{J_1(r_p)}{\rho} J_0(r_p) dp, \quad (6)$$

которое после вычисления интеграла можно записать в форме:

$$T(r, z) = T_c + \frac{qR_k}{\lambda} \times \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{r}{R_k} \right), r < R_k \\ \frac{r}{R_k} K \left[\frac{R_k}{r} - \left(1 - \frac{r^2}{R_k^2} \right) E \left(\frac{R_k}{r} \right) \right], r > R_k \end{array} \right\}, \quad (7)$$

где $k(x)$ – и $E(x)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

Тогда из (7) следует, что температура в центре пятна и на его краю определяется выражениями

$$\begin{aligned} T(0, 0) &= T_c + \frac{qR_k}{\lambda}, \\ T(R_k, 0) &= T_c + \frac{2qR_k}{\pi\lambda}. \end{aligned} \quad (8)$$

Среднее же значение температуры в пятне равно

$$\bar{T} = T_c + \frac{8qR_k}{3\pi\lambda}. \quad (9)$$

Соотношение, определяющее плотность потока тепла q , создаваемого потоком положительных ионов, возвращающихся на поверхность катода в катодном пятне, имеет вид:

$$q = \frac{i_i}{\pi R_k^2} (U_i - U_k) - n_a v_a m_a \eta, \quad (10)$$

где i_i – величина тока, создаваемого потоком ионов, U_i – потенциал ионизации атомов металла катода, $n_a v_a$ – плотность потока испаряющихся атомов металла катода, m_a – масса атома, η – теплота испарения металла катода.

Согласно закону Герца-Кнудсена [12] для испарения металлов

$$n_a v_a = \frac{P}{\sqrt{2\pi m_a k T}}, \quad (11)$$

где P – давление пара, k – постоянная Больцмана.

Из полученных прежде данных [2–8], можно сделать заключение, что

$$i_i \approx 0,9n_a v_a e = \frac{0,9P \cdot e}{\sqrt{2\pi m_a kT}}, \quad (12)$$

где e – заряд электрона.

Тогда из (10)–(12) получаем, что

$$q = \frac{P}{\sqrt{2\pi m_a kT}} [0,9(U_i + U_k)e - m_a \eta], \quad (13)$$

$$T - T_c = \frac{8R_k}{3\pi\lambda} \frac{P}{\sqrt{2\pi m_a kT}} [0,9(U_i + U_k)e - m_a \eta]. \quad (14)$$

Следовательно

$$R_k = \frac{3\pi\lambda(T - T_c)\sqrt{2\pi m_a kT}}{8P[0,9(U_i + U_k)e - m_a \eta]}. \quad (15)$$

Результаты и обсуждение

Итак, формула (15) позволяет рассчитать радиус R_k катодного пятна вакуумной дуги металлов. В ней только одна величина, достаточно неоднозначна – это температура поверхности T в катодном пятне. Для того, чтобы взять какое-то значение этой температуры будем исходить из того факта, что большинство исследователей [1–10] сходятся во мнении, что температура поверхности катода в катодном пятне очень близка к температуре кипения металла. Поэтому в представленных ниже результатах расчетов радиуса катодного пятна принято, что температура поверхности катода в катодном пятне равна температуре кипения металла катода. Данные по катодному падению потенциала U_k , которые также довольно неоднозначны, взяты из работы [13]. Результаты расчетов величины R_k для некоторых чистых металлов представлены в табл. 1.

Табл. 1

Радиус катодного пятна R_k

Элемент	Ti	Al	Fe	Cu	Ni	Sn	Mg
R_k , мкм	30	85	80	300	80	75	30

Сравнение полученных расчетом значений R_k с экспериментально измеренными, представленными в работах [2–10] показывает, что наблюдается их удовлетворительное согласование и это подтверждает правильность полученной формулы (15). Кроме того, полученная формула (15) позволяет оценить величину температуры поверхности металла в катодном пятне. В самом деле, зная радиус R_k катодного пятна, можно при температуре поверхности в пятне равной температуре кипения металла оценить массу испаряемого металла m_a в единицу времени. При этой же температуре кипения металла можно оценить и количество эммитируемых в этой же поверхности электронов N_e . Отношение

$$\eta = \frac{m_a}{N_e} \quad (16)$$

представляет собой коэффициент электропереноса вакуумной дуги металлов. По данной характеристике имеется обширный массив экспериментально измеренных и тео-

ретически расчетных данных [2–10, 12, 13]. Используя все эти данные, удалось выяснить, что температуру поверхности в катодном пятне вакуумной дуги чистого Ti меньше температуры его кипения на 150–200 К, а для Al – на 100–140 К. Только при таких температурах поверхности для Ti и Al их экспериментально измеренные коэффициенты электропереноса с точностью 10–15 % совпадают с теоретически рассчитанными.

Выводы

Таким образом, получено выражение для расчета радиуса катодного пятна вакуумной дуги металлов, которое позволяет удовлетворительно оценивать радиус катодного пятна, а также температуру поверхности в катодном пятне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек, Ж.Л. Основы формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж.Л. Мрочек, Б.А. Эйзнер, Г.В. Марков. – Минск: Навука і тэхніка. 1991. – 152 с.
2. Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. – М., 1982. – 385 с.
3. Любимов, Г.А. Катодное пятно вакуумной дуги / Г.А. Любимов, В.И. Раховский. – УФН. 1978. т. 125 4. – С. 665–706.
4. Раховский, В.И. Физические основы коммуникации электрического тока в вакууме / В.И. Раховский. – М., 1971. – 369 с.
5. Бейлис, И.И. ЖТФ / И.И. Бейлис, М.П. Зенцер, Г.А. Любимов. – 1988. – Т.58. №10. – С. 1861–1870.
6. Handbook of Vacuum Arc: Science and Technology/ Edited by R.L. Boxman. D.M. Sanders, and Ph.J. Martin. – New Jersey, 1995. – 212 p.
7. Кессаев, И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кессаев. – Наука. 1968. – 253 с.
8. Месяц, Г.Л. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г.Л. Месяц. – М., 2000. – 424 с.
9. Немчинский, В.А. Журнал технической физики / В.А. Немчинский. – 1982. Т.52. №4. – С. 1748–1755.
10. Немчинский, В.А. Журнал технической физики / В.А. Немчинский. – 1985. Т.55. №41. – С. 60–66.
11. Трантер, К.Д. Интегральные преобразования в математической физике / К.Д. Трантер. – М.: Наука, 1983. – 750 с.
12. Ивановский, М.Н. Испарение и конденсация металлов / М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, В.И. Субботин. – М.: Наука, 1976. – 287 с.
13. Процессы ионизации в катодном пятне вакуумной дуги металлов / А.П. Ласковнѳв [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Обработка металлов давлением / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – С.364–370.

REFERENCES

1. Mrochek Zh.L., Eyzner B.A., Markov G.V. Osnovy formirovaniya mnogokomponentnyih vakuumnyih elektrodugovyih pokrytityi [Basics of formation of multicomponent vacuum electric arc coatings]. Minsk: Navuka i tehnika. 1991. 152 p. (in Russian)
2. Vakuumnyie dugi [Vacuum arcs]. Edit: Dzh. Lafferti. Moscow, 1982. 385 p. (in Russian)
3. Lyubimov G.A., Rahovskiy V.I. Katodnoe pyatno vakuumnoy dugi [Cathode spot of vacuum arc], «UFN». 1978. t. 125 4. pp. 665– 706. (in Russian)
4. Rahovskiy V.I. Fizicheskie osnovy kommunikatsii elektricheskogo toka v vakuume [Physical basis of electric current communication in vacuum]. Moscow, 1971. 369 p. (in Russian)
5. Beylis I.I., Zentser M.P., Lyubimov G.A. /// ZhTF. 1988. T.58. #10. pp. 1861–1870.
6. Handbook of Vacuum Arc: Science and Technology/ Edited by R.L.Boxman. D.M.Sanders, and Ph.J.Martin. New Jersey. 1995. 212 p.
7. Kessaev I.G. Katodnyie protsessyie elektricheskoy dugi [Cathodic processes of an electric arc]. Nauka. 1968. 253 p.
8. Mesyats G.L. Ektonyi v vakuumnom razryade: proboy, iskra, duga. Moscow, 2000. 424 p. (in Russian)
9. Nemchinskiy V.A. Zhurnal tehnicheckoy fiziki [Journal of Technical Physics]. 1982. T.52. #4. pp. 1748 – 1755. (in Russian)
10. Nemchinskiy V.A. / Zhurnal tehnicheckoy fiziki [Journal of Technical Physics]. 1985. T.55. #41. pp. 60–66. (in Russian)
11. Tranter K.D. Integralnyie preobrazovaniya v matematicheskoy fizike. Moscow, Nauka, 1983. 750 p. (in Russian)
12. Ivanovskiy M.N., Sorokin V.P., Subbotin V.I. Isparenie i kondensatsiya metallov. Moscow, Nauka, 1976, 287 p. (in Russian)
13. Laskovnyov A.P., Volochko A.T., Markov G.V., Ralko A.P., Misuno P.N. , Makarova Zh.E. Protsessyie ionizatsii v katodnom pyatne vakuumnoy dugi metallov /Sovremennyye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov: Sb. nauchnyih trudov. V 3 kn. Kn. 2. Obrabotka metallov davleniem / edit: S.A. Astapchik [et al.] Minsk: FTI NAN Belarusi, 2013. pp. 364–370. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 23.05.18