

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-51-12-18>

ЛОКАЛЬНОЕ И ИНТЕГРАЛЬНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАТОДНЫХ ПЯТЕН ВАКУУМНОЙ ДУГИ ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ ИМИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кузнецов В.Г.

*Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: вакуумная дуга, катодное пятно, температура, микрокапли, модифицирование поверхности, математическая модель.

Аннотация. На основе анализа тепловых процессах на электродах вакуумно-дуговых источников плазмы разработана математическая модель и получены аналитические выражения для расчета поверхностей электродов, обеспечивающих стабильное горение вакуумно-дугового разряда при больших токах дуги без образования зон локализации разряда в виде анодных пятен. Для того чтобы избежать режима работы испарителя с анодным пятном необходимо правильно рассчитать геометрию анода. Показано, что шероховатость поверхности при обработке ее катодными пятнами вакуумной дуги определяется скоростью эрозии металла, его удельной теплотой испарения, средним давлением, действующим в области катодного пятна, скоростью вылета жидкого металла, выдавливаемого из катодного пятна в виде микрокапель.

LOCAL AND INTEGRAL TEMPERATURE INFLUENCE OF THE CATHODIC SPOTS OF THE VACUUM ARC WHEN THEY MODIFY THE SURFACE TO BE PROCESSED

Kuznetsov V.G.

*Institute of Problems of Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg, Russia*

Keywords: vacuum arc, cathode spot, temperature, microdroplets, surface modification, mathematical model.

Abstract. Based on the analysis of thermal processes on the electrodes of vacuum-arc plasma sources, a mathematical model has been developed and analytical expressions have been obtained for calculating the surfaces of the electrodes that ensure stable operation of the vacuum-arc discharge at high arc currents without the formation of localized discharge zones in the form of anodic spots. In order to avoid the anode spot mode of the evaporator, it is necessary to correctly calculate the geometry of the anode. It has been shown that the surface roughness during processing by the cathode spots of a vacuum arc is determined by the rate of metal erosion, its specific heat of vaporization, the average pressure acting in the cathode spot region, and the rate of liquid metal extruded from the cathode spot in the form of microdroplets.

Обработка поверхности катодными пятнами вакуумной дуги — направление научных исследований и практического применения, которое в последние годы активно развивается. Помимо традиционного применения вакуумно-дуговой обработки для очистки поверхности металлов и сплавов от окалина, ржавчины, масляных пленок, технологических отложений и других загрязнений с целью дефектоскопии металла или для последующего

нанесения покрытий, осваиваются новые области применения. Закалка поверхностного слоя металлов, изменение физико-химических характеристик поверхностного слоя конструкционных материалов, восстановление пластически деформированной формы поверхности изделий, очистка поверхностей перед их сваркой для получения качественного сварного шва, создание заданного микрорельефа поверхности, например, для удержания масляных пленок на поверхности, создание на поверхности пассивирующих пленок для защиты от коррозии – далеко не полный перечень современного использования технологии вакуумно-дуговой обработки поверхности [1-3].

Отмеченные выше технологические процессы реализуются при воздействии на поверхность так называемых катодных пятен вакуумно-дугового разряда второго рода с размерами в диаметре на уровне 10^{-4} м. При этом температура на поверхности катодного пятна близка к температуре кипения обрабатываемого материала. Скорость эрозии металла $\dot{m}$ связана с силой тока вакуумно-дугового разряда I и в первом приближении зависит от тока линейно [4]:

$$\dot{m} = \mu \cdot I, \quad (1)$$

где μ – коэффициент электропереноса, зависящий от материала катода.

Мощность, расходуемая на испарение материала P_1 можно выразить через скорость эрозии следующим образом

$$P_1 = \dot{m} W_u / M, \quad (2)$$

где M – масса атома, W_u – удельная теплота испарения.

В работе [5] оценено среднее давление, действующее в области катодного пятна, P , связанное с наличием потока ионов с катода. Оно определялось через величину плотности тока в катодном пятне J и силу отдачи на единицу протекающего тока F , как $P = F/J$. Скорость вылета жидкого металла из катодного пятна U_s оценивалась через давление P и плотность среды ρ с помощью формулы Бернулли

$$U_s = \sqrt{2P/\rho}. \quad (3)$$

В сформировавшемся плазменном потоке между обрабатываемой поверхностью (катодом) и анодом часть ионов возвращается на поверхность катодного пятна, разогревая поверхность до температур, близких к температуре кипения материала катода. Остальная часть ионов распространяется в объем вакуумной камеры. Мощность, выделяющаяся в зоне катодного пятна, приводит к кипению расплавленного металла, и под действием высокого давления, создаваемого потоком ионов, расплавленный металл выдавливается в виде микрокапель. Согласно [6], это выдавливание производится внешним давлением (108 Па), обусловленным воздействием ионов и нейтральных частиц, а также отдачей, возникающей при испарении материала катода. В зоне катодного пятна формируется лунка, которая со временем углубляется, и разряд на катоде переходит на соседний с данной лункой участок, формируя новую лунку. Таким образом, на поверхности обрабатываемого материала формируется шероховатая структура, размер

шероховатости которой в значительной степени зависит от тока вакуумной дуги.

Электрический ток в зоне КП (катодного пятна) состоит из двух составляющих – тока разряда в плазме и тока, протекающего по катоду. Магнитные поля, создаваемые этими токами, приближенно можно считать полями, образованными линейными токами: B_1' – магнитное поле, создаваемое полем разряда; B_1'' – поле, создаваемое текущим по катоду током. Оба поля направлены тангенциально к катоду. При их сложении слева и справа от КП возникает асимметрия в распределении суммарного поля: слева от КП $B_\Sigma^r = B_1'' - B_1'$, справа от КП $B_\Sigma^r = B_1'' + B_1'$. В соответствии с принципом максимума предпочтительным будет центростремительное движение КП, причем оно тем более ярко выражено, чем тоньше катод и чем больше его диаметр.

При малых междуэлектродных промежутках, имеющих место в вакуумно-дуговых испарителях протяженного типа с дополнительными анодами и в системах вакуумно-дуговой очистки, на движение катодного пятна оказывает влияние магнитное поле, создаваемое токовым каналом на аноде. Кроме того, необходимо учитывать влияние различных пленок на поверхности катода, способствующих изменению направления движения катодного пятна.

Теоретически проведена оптимизация площади приемной поверхности анода – основного параметра, влияющего на образование анодного пятна в вакуумно-дуговом разряде.

Для нормального поддержания дугового разряда в вакууме, необходимо обеспечить эффективные условия замыкания электронного тока на анод. В случае недостаточной приемной поверхности анода, непосредственно контактирующей с плазмой, электронный ток насыщения будет не в состоянии обеспечить замыкания тока дуги на анод, что приводит к нестабильному горению разряда.

Между плазмой и анодом, так же, как и в случае с катодом, формируется приэлектродный слой объемного заряда. За счет этого слоя между ними возникает разность потенциалов (прианодное падение напряжения), регулирующая поступление заряженных частиц на поверхность электрода. Прианодное падение напряжения U_a может иметь как положительный, так и отрицательный знак, а его значение в зависимости от режима работы и геометрии анода может изменяться в широких пределах [7]:

$$U_a = -\frac{kT_e}{e} \ln \frac{j_e}{j_a}, \quad (4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/кул – постоянная Стефана – Больцмана; T_e – температура электронов в плазме; e – элементарный заряд, $j_e = 0,25en(8kT_e/\pi m_e)^{1/2}$ – плотность хаотического тока электронов, где n – концентрация электронов в

плазме, m_e – масса электрона; $j_a = I_{разр} / S_a$ – плотность разрядного тока на аноде; S_a – площадь анода.

Изменение знака анодного падения потенциала может произойти только в том случае, если плотность тока j_a становится равной или больше j_e . Данный переход возможен, например, за счет уменьшения приемной поверхности анода, наложения внешнего магнитного поля, приводящего к замагничиванию электронной компоненты плазмы, или с изменением других условий существования разряда. С уменьшением площади анода (или соответственным изменением плотностей токов j_e и j_a) ионная оболочка сначала исчезает (в этом случае $I_a = j_e S_a$, а $U_a = 0$), а затем заменяется на электронную.

Если протяженность прианодного слоя приближается к величине циклотронного радиуса электронов, то поперечное магнитное поле начинает оказывать существенное влияние на диффузный ток электронов из плазмы на анод:

$$J_{эфф} \approx J_e \frac{\pi}{\omega_e \tau_e} \exp\left(-\frac{eU_a}{kT_e}\right), \quad (5)$$

где $\omega_e \tau_e$ параметр Холла для электронов; $\omega_e = eB / m_e$ – циклотронная частота для электронов; B – индукция магнитного поля, τ_e – среднестатистическое время между двумя соседними столкновениями для электронов.

Таким образом, анодное падение потенциала, его знак и величина, является тем регулятором, который поддерживает концентрацию заряженных частиц перед анодом на уровне, обеспечивающем подведение к нему разрядного тока.

Для вакуумных дуговых источников плазмы оптимальным является режим с отрицательным анодным падением, так как в противном случае возрастает уровень мощности, выделяющейся на аноде. При выборе приемной поверхности анода необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$S_a \geq \frac{4I_{разр} \omega_e \tau_e}{\pi e n_e \sqrt{8kT_e / \pi m_e}}. \quad (6)$$

В противном случае с увеличением тока разряда выше некоторого критического значения напряжение на дуге резко возрастает и становится нестабильным, амплитуда колебаний напряжения достигает нескольких десятков вольт. Разряд, прежде диффузный, сжимается около анода. При этих условиях, мощности, подводимой к аноду электронным потоком, достаточно для его испарения. Наблюдается локальное увеличение концентрации частиц за счет ионизации атомов анодного материала, что обуславливает разогрев распыляемого участка на поверхности анода и способствует образованию на нем анодного пятна – ярко светящейся области с плотностью тока $10^4 \dots 10^5$ А/см² и большой удельной мощностью 10^5 - 10^6 Вт/см². Дальнейшее увеличение тока ведет к увеличению размеров анодного пятна, которое превращается в мощный источник плазменной струи, начинающее играть доминирующую роль в разряде.

Для приближенного расчета выделяемой на аноде мощности [8] можно использовать выражение:

$$P_a = I_a \left(\frac{2kT_e}{e} + \phi + U_a \right), \quad (7)$$

где P_a – мощность, выделяющаяся на аноде; I_a – ток разряда, достигающий анода; ϕ – работа выхода электрона из материала анода; $2kT_e/e$ – средняя кинетическая энергия электронов, приходящих из плазмы в анодную область; U_a – величина прианодного скачка потенциала.

Для того чтобы избежать режима работы испарителя с анодным пятном необходимо правильно рассчитать геометрию анода. Разработана методика расчета поверхности анодов вакуумно-дуговых генераторов плазмы. Большинство известных результатов по изучению поведения катодных пятен получены в исследованиях, проводимых на чистой поверхности металлов. Движение катодных пятен по загрязненной поверхности (окалина, ржавчина, масляные пленки и др.) и характер их влияния на поверхностные слои материалов в этих условиях практически не исследовались. В связи с тем, что в ряде случаев разрабатываемое оборудование необходимо встраивать в существующие технологические линии непрерывного процесса производства, особые требования выдвигаются к надежности работы оборудования при скоростях очистки до нескольких метров в секунду и продолжительной непрерывной работе.

Основными направлениями повышения надежности, производительности, эффективности технологии и оборудования вакуумно-дуговой очистки являются совершенствование систем управления катодными пятнами, оптимизация конструкции и геометрии катодно-анодных узлов и шлюзовых систем, оптимальный выбор вакуумных насосов, решение проблем, связанных с удалением продуктов очистки из вакуумной системы, оптимизация тепловых процессов на электродах и др.

Разработанная математическая модель и полученные аналитические выражения для расчета поверхностей электродов, обеспечивающих стабильное горение вакуумно-дугового разряда при больших токах дуги без образования зон локализации разряда в виде анодных пятен, использованы, например, при разработке анодных узлов в установках по очистке поверхностей (рис. 1) металлической ленты от технологической смазки (рис. 1, а) и в установке по очистке внутренней поверхности корпуса бокса грузового железнодорожного вагона (рис. 1, б).

Отмеченные выше технологии обработки поверхности металлов реализуются, как правило, без использования внешнего магнитного поля, за счет воздействия на поверхность катодных пятен второго рода.

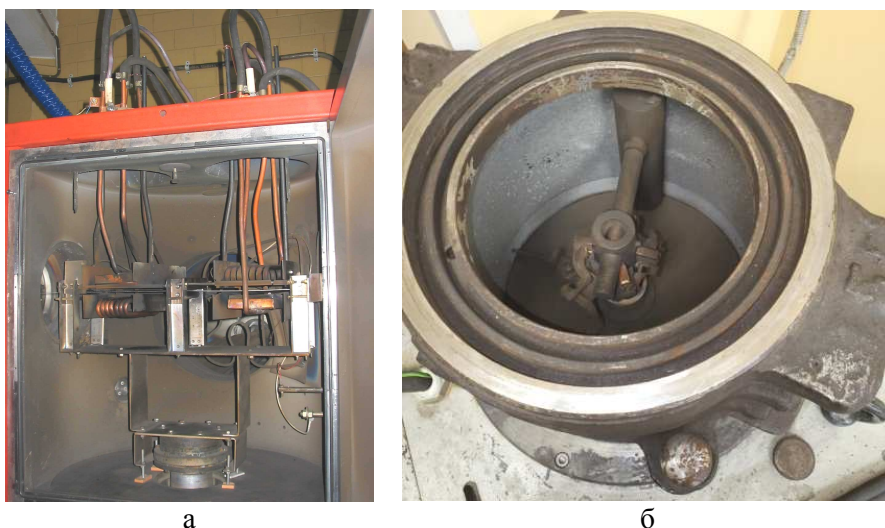


Рис. 1. Конструкции анодных узлов разработанного оборудования:
а) анодный узел установки для очистки металлической ленты;
б) анодный узел установки для очистки корпуса буксы вагона

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №124041500007-4).

Список литературы

1. Стешенкова Н.А., Шумилов В.П., Кузнецов В.Г., Шалимов А.Г., Соколов О.Г. Оптимизация геометрии и конструкции устройства электродуговой вакуумной очистки рулонного проката // Вестник технологии судостроения. – 2005. – №13. – С. 43-50.
2. Кузнецов В.Г., Курбанов Т.А., Крымов Д.В., Пониматкин В.П. Восстановление формы пластически деформированной поверхности под действием обработки катодными пятнами вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. – 2014. – Т. 23, №1. С. 78-81.
3. Патент № 2560112 РФ. Способ дефектоскопии металлических изделий при их поверхностной обработке / В.Г. Кузнецов, Т.А. Курбанов, В.П. Пониматкин. – Заявка №2014119452 от 14.05.2014; опублик. 20.08.2015, Бюл. № 23.
4. Абрамов И.С., Быстров Ю.А., Вильдгрубе В.Г. Плазменные ускорители и их применение в технологии // Обзоры по электронной технике. Серия 4. Электровакuumные и газоразрядные приборы. – 1986. – Вып. 3(1204). – 42 с.
5. McClure G.W. Plasma expansion as a cause of metal displacement in vacuum-arc cathode spots // Journal of Applied Physics. 1974, vol. 45, no. 5, pp. 2078-2084.
6. Daalder J.E. A cathode spot model and its energy balance for metal vapour arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. 1972, vol. 45, pp. 1667-1682.
7. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. – М.: Машиностроение, 1983. – 231 с.
8. Лапко Н.Б., Поротников А.А., Поляков Л.М. и др. Исследование лучистых потоков с анода в сильноточном разряде. – Плазменные ускорители / Под ред. П.А. Арцимовича. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 179-182.

References

1. Steshenkova N.A., Shumilov V.P., Kuznetsov V.G., Shalimov A.G., Sokolov O.G. Optimization of geometry and design of electric arc vacuum cleaning device for rolled products // Bulletin of Shipbuilding Technology. 2005, no. 13, pp. 43-50.
2. Kuznetsov V.G., Kurbanov T.A., Krymov D.V., Ponimatkin V.P. Restoration of the shape of a plastically deformed surface under the action of treatment with cathode spots of a vacuum-arc discharge // Vacuum engineering and technology. 2014, vol. 23, no. 1, pp. 78-81.
3. Patent No. 2560112 RU. A method of flaw detection of metal products during their surface treatment / V.G. Kuznetsov, T.A. Kurbanov, V.P. Ponimatkin. – Appl. No. 2014119452 from 14.05.2014; publ. 20.08.2015, Bul. No. 23.
4. Abramov I.S., Bystrov Yu.A., Wildgrube V.G. Plasma accelerators and their application in technology // Reviews on electronic technology. Series 4. Electrovacuum and gas discharge devices. 1986, iss. 3(1204), 42 p.
5. McClure G.W. Plasma expansion as a cause of metal displacement in vacuum-arc cathode spots // Journal of Applied Physics. 1974, vol. 45, no. 5, pp. 2078-2084.
6. Daalder J.E. A cathode spot model and its energy balance for metal vapour arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. 1972, vol. 45, pp. 1667-1682.
7. Grishin S.D., Leskov L.V., Kozlov N.P. Plasma accelerators. – M.: Mechanical Engineering. 1983.
8. Lapko N.B., Porotnikov A.A., Polyakov L.M. and others. Investigation of radiant fluxes from an anode in a high-current discharge. – Plasma accelerators / Edited by P.A. Artsimovich. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – P. 179-182.

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией	Kuznetsov Viacheslav Gennadievich – doctor of technical sciences, head of laboratory
kvg-ipme@yandex.ru	

Received 17.12.2025