

УДК 533.9.07

Д. К. Кострин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Управление режимом работы вакуумно-дугового источника плазмы

*Интерес, проявленный к дуговому разряду в вакууме, вызван возможностью его применения для решения различных технологических задач: получения металлических и комбинированных покрытий, а также для обработки поверхности, что позволяет удалять поверхностные загрязнения. Эмиссия в таком разряде происходит в основном из катодных пятен, которые хаотично движутся по катоду. Их скорость передвижения, а также количество сильно зависят от поверхностных свойств и материала, из которого изготовлен катод. Важнейшей целью при разработке устройств для удаления поверхностного загрязнения служит управляемая природа движения и надежная фиксация катодных пятен. В статье показана возможность управления режимом работы плазменного источника, позволяющая за счет правильного выбора его конструкции и основных параметров, перевести его из режима получения покрытий в режим очистки поверхности материала. В результате поверхностной активации плазмой возникает пассивирующая пленка, которая защищает слой металла от коррозии, а сама поверхность становится сильно адгезивной.*

### Вакуумно-дуговой разряд, эмиссия, катодные пятна, нанесение покрытий, очистка поверхности

Интерес, проявленный к вакуумно-дуговому разряду (ВДР), вызван возможностью изучения сложных физических процессов, соединяющих различные тесно связанные между собой среды существования (твердое тело, жидкость, пар, ионизированный газ, плазма), и перспективой его применения для решения технологических задач [1]–[4].

Центр эмиссии ВДР – это катодное пятно (КП), которое хаотично перемещается по рабочей поверхности [5]–[7]. Характерное явление для КП – их ретроградное движение по отношению к силе Ампера [8], [9]. Процессы, происходящие на интегрально-холодном катоде в КП, в первую очередь касаются проблем физики твердого тела; далее рассматриваются рабочие зоны, в которых последовательно достигаются температуры плавления и кипения [10]. Скорость движения КП на рабочей поверхности достигает 100 м/с, что приводит к циклическому процессу появления и исчезновения центров эмиссии и непрерывного изменения условий существования ВДР. Высокая температура в КП вызывает интенсивную дисперсию (разрушение) материала катода (металла)

и высокую концентрацию его паров над зоной эрозии (рис. 1, где 1 – парообразная фаза; 2 – жидкая фаза; 3 – область прогрева катода до температуры эмиссии; 4 – тепловой поток, воздействующий на поверхность; 5 – потоки заряженных и нейтральных частиц, а также капельных образований, покидающие поверхность). Из области КП за счет термоавтоэлектронной эмиссии обеспечивается необходимое количество электронов, которые, будучи ускоренными в прикатодной области, осуществляют ионизацию нейтральных частиц и формирование плазменного потока, который может быть разделен на плотную неидеальную, умеренно разреженную и бесстолкновительную плазму [5].

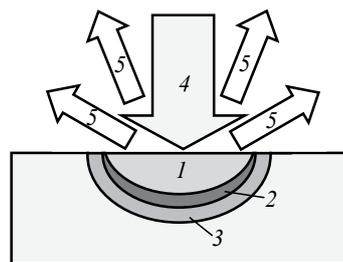


Рис. 1

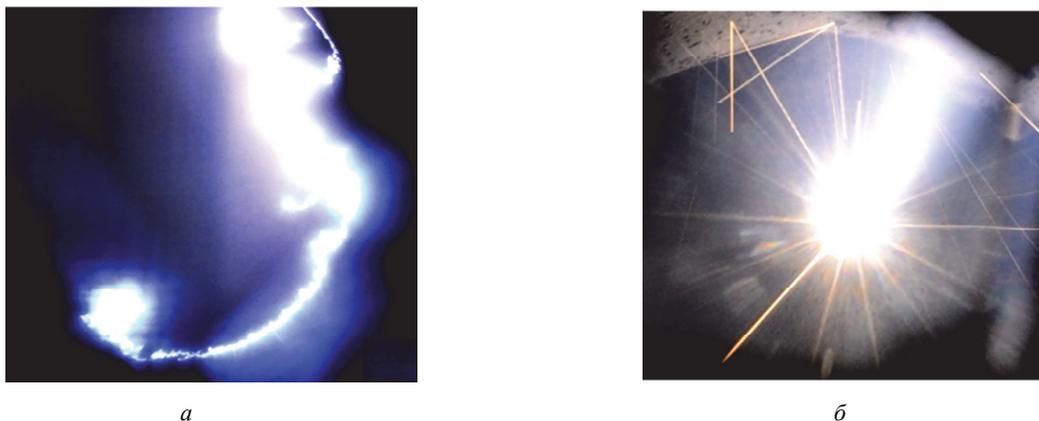


Рис. 2

При условии нанесения заряженных частиц (ионы) и атомов диспергированного материала катода на поверхность их конденсация происходит с протеканием фазовых переходов.

На практике ВДР применяется главным образом для получения металлических и сложных комбинированных покрытий, а также для очищения изделий, что позволяет выполнять удаление поверхностных пленок и иных загрязнений [11].

Использование ВДР для очищения поверхностей металлов особенно актуально при работе с изделиями большого размера, а также в случае ремонта разнообразных контейнеров и труб [12].

В [10] продемонстрировано, что в процессе горения ВДР в первые моменты на необработанной поверхности катода появляется неконтролируемый разряд, перемещающийся хаотически и достаточно быстро покрывающий ее всю.

Присутствие включений и несовершенств на поверхности оказывает существенное влияние на тепловые эмиссионные характеристики металлов и вызывает значительное изменение их работы выхода (десятичные доли электронвольта). Эти факторы значительно облегчают возникновение разряда, которое может происходить при меньшем разрядном токе. Стоит отметить, что скорость передвижения КП и их количество, а также общий вид процесса горения ВДР сильно зависят от материала катода (рис. 2: *а* – титан; *б* – углерод (графит)) [13].

Общий ток разряда определяет число КП, одновременно движущихся по стенкам катода. Таким образом, на поверхностных неоднородностях разряд, который замкнут на каждом из КП, может быть поддержан током в несколько ампер. Очевидно, что с ростом разрядного тока увеличивается и число возникающих КП. На рис. 3 приведены зависимости скорости передвижения КП  $v$  от тока разряда  $I_{\text{раз}}$  при разных значениях напряженности магнитного поля  $H$  [4].

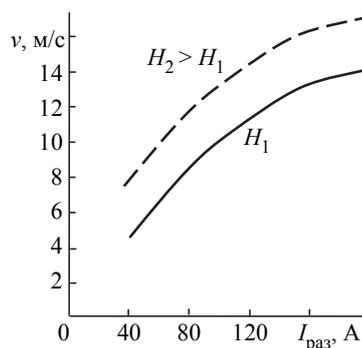


Рис. 3

В случае большой плотности энергии, которая сосредоточена в КП, наблюдается локальное нагревание поверхностного слоя материала катода, взрывное испарение загрязнений и формирование потоков плазмы с обработанной поверхности.

Основные процессы, наблюдаемые в процессе горения ВДР, определены только существованием КП, которые в значительной мере нестабильны и характеризуются определенным средним временем существования. Главной целью при разработке устройств на основе ВДР для удаления поверхностного загрязнения служат надежная фиксация и управляемая природа движения КП вдоль рабочей поверхности [5].

Известно, что после формирования КП двигается и сохраняется на той области катода, которая обеспечивает наилучшие условия, для того чтобы разряд замкнулся на поверхность анода. Природа формирования потока плазмы с КП ВДР предопределяет его движение с существенным расширением в направлении анода и перпендикулярно поверхности катода.

При проектировании анода следует принять во внимание, что плазменный поток от КП рассеивается с определенными угловыми характеристиками и что ионы обладают значительной направленной скоростью движения. Поэтому для

нормального поддержания ВДР необходимо обеспечить наилучшие условия для замыкания тока разряда на анод.

Наименьшее расстояние между электродами устройства определено ограничениями процессов локализации разряда и замыкания тока электронов между катодом и анодом. Распределение интенсивности электрического поля в ВДР определено потенциалами, заданными как на катоде, так и на аноде, а также свойствами плазмы и дислокацией носителей зарядов в объеме вакуумной камеры. Полное падение напряжения состоит из прикатодного падения напряжения, перепада напряжения на столбе дуги ВДР и прианодного падения напряжения (ППН) [14].

Принимая однородность столба дуги, падающее на ней напряжение обусловлено электрическим полем и длиной самой дуги. Обычно в вакуумно-дуговых плазменных источниках (ВДПИ), используемых для формирования покрытий, удаление анода от катода достигает 50 см. В случае недостатка зоны анода, находящейся в прямом контакте с плазмой, электронный ток насыщения не в состоянии обеспечить замыкание тока ВДР, что может привести к нестабильной работе испарителя.

Приэлектродный слой пространственного заряда, формирующий ППН, регулирует поток заряженных частиц и способен иметь как отрицательный, так и положительный знаки (рис. 4, а и б соответственно, где 1 – катод; 2 – анод; 3 – КП; 4 – плазменный поток).

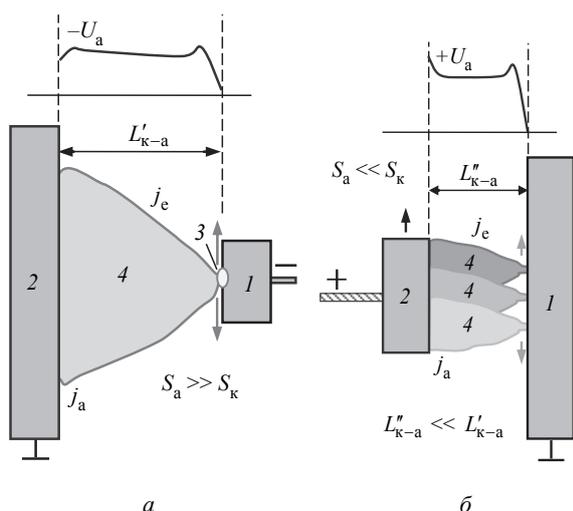


Рис. 4

Значение ППН обусловлено режимом работы и конструкцией анода и может изменяться в довольно широких пределах:

$$U_a = -(kT_e/e)\ln(j_e/j_a),$$

где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$  – постоянная Больцмана;  $T_e$  – электронная температура;  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона;  $j_e = 0.25en\sqrt{8kT_e/(\pi m_e)}$  – плотность хаотического тока электронов, движущихся из плазмы к аноду,  $n$  – концентрация электронов,  $m_e$  – масса электрона;  $j_a = I_{\text{раз}}/S_a$  – плотность тока ВДР на аноде;  $I_{\text{раз}}$  – амплитуда тока ВДР;  $S_a$  – используемая поверхность анода. Положительные или отрицательные значения ППН будут зависеть от отношения  $j_e/j_a$ .

При определении требуемой площади анода необходимо обратить внимание на выполнение следующего условия:

$$S_a \geq \frac{4I_{\text{раз}}\omega_e\tau_e}{\pi n_e\sqrt{8kT_e/(\pi m_e)}},$$

где  $\omega_e$  – циклотронная частота для электронов;  $\tau_e$  – среднее время между столкновениями.

Отрицательное ППН возникает при условии  $j_e S_a > I_{\text{раз}}$  ( $j_e > j_a$ ) и обеспечивается в случае постоянного тока ВДР при увеличенной площади анода ( $S_a \gg S_k$ ), к которой примыкает область плотной плазмы с высокой степенью ионизации (рис. 4, а).

Эти условия осуществлены в ВДПИ, используемых для нанесения пленок и покрытий, в которых отрицательное ППН мало (единицы вольт), иначе увеличивается мощность, приходящаяся на анод. Хаотический ток электронов из плазмы снижается потенциальным барьером  $U_a$ , а ток ионов проходит свободно, при условии отсутствия поверхностной ионизации (выхода ионов из анода).

Сокращение используемой площади анода  $S_a$  приводит к изменению знака ППН. При этом плотность тока на аноде становится сопоставимой с плотностью электронного тока или даже большей. К дополнительным параметрам, обуславливающим значение положительного ППН, относятся:

- процессы, уменьшающие появление ионов;
- процессы, ускоряющие выведение ионов из области анода;
- уменьшение температуры электронов около анода;
- снижение давления рабочего газа;
- увеличение полного тока ВДР;
- повышение напряженности электрического поля в области анода.

Таким образом, в качестве факторов, определяющих ППН, стоит учитывать те, которые обеспечивают концентрацию электронов и ионов около стенки анода на значении, приводящем к замыканию тока ВДР:

- площадь используемой поверхности анода;
- расстояние между электродами;
- уровень вакуума в установке;
- амплитуда разрядного тока.

Для обеспечения ограничения зоны присутствия КП на поверхности детали и ее последовательного сдвига из-за перемещения электродов применяется анод с рабочей поверхностью, меньшей, чем поверхность катода. В то же время анод располагается на расчетном расстоянии  $L_{к-а}$ , обеспечивающем положительное ППН (рис. 4, б).

Внедрение мер по стабилизации процесса очистки с применением ВДР реализуется достаточно просто, не вызывает необходимости использовать дорогостоящие проектные решения, но при этом позволяет обрабатывать объекты сложных форм, включая отдельные труднодоступные секции деталей.

В данном случае КП, перемещающееся под одновременным воздействием электрического и магнитного полей, после возникновения продолжает оставаться в области катода, характеризующейся минимальным напряжением, требуемым для поддержания ВДР, т. е. в области с наименьшим расстоянием катод–анод (рис. 4, б).

Можно сказать, что движение КП по поверхности изделия определено только взаимным расположением электродов (рис. 4, б), а зона дрейфа КП ограничена выбранными размерами рабочей поверхности анода. Этот факт приводит к увеличению темпа роста температуры области катода, подвергающейся воздействию ВДР, что приводит к повышению скорости его распыления.

Время, в течение которого анод находится напротив очищаемой поверхности, обусловлено удельной тепловой мощностью, сосредоточенной в КП. В результате движения КП обеспечивается последовательное расплавление и испарение части материала на внешней грани изделия. В свою очередь, нагрев очищаемого объекта в областях поблизости от КП приводит к химическим реак-

циям разложения находящихся на поверхности диэлектрических пленок.

Последовательная обработка стороны изделия с помощью КП позволяет достигать высокой однородности при очистке поверхности. Передвижение КП ВДР по грани объекта приводит к ее сглаживанию и уменьшению количества существующих на ее поверхности микронеровностей. Использование рассматриваемого метода управления передвижением КП позволяет, фиксируя взаимное положение электродов, создать на обработанной поверхности легко различимую границу между нетронутой областью (1) и зоной, подвергнутой воздействию ВДР (2) (рис. 5).

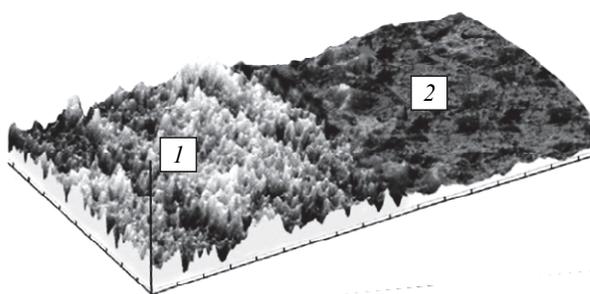


Рис. 5

В результате поверхностной активации плазмой ВДР появляется пассивирующая пленка, которая защищает слой металла от коррозии, а сама поверхность становится сильно адгезивной [15].

Рассмотренная система ВДПИ благодаря регулировке области используемой поверхности анода, темпа направленного передвижения электродов и амплитуды тока ВДР дает возможность регулировать отношение температур между плазменной дугой ВДР и слоем материала на поверхности обрабатываемого изделия.

Вследствие изменения конструкции анода возникает возможность получения плазменных потоков переменной мощности и направления. Также осуществляется регулировка потоков тепла к электродам или стенкам камеры.

Надежная стабилизация КП и осуществление их контролируемого движения по поверхности позволяют на практике реализовывать технологию обработки изделий с применением ВДР. Такое устройство ВДПИ позволяет в значительной мере оптимизировать процесс удаления поверхностного загрязнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anders A. Cathodic arcs: From fractal spots to energetic condensation. New York: Springer-Verlag, 2008. 544 p.

2. Лисенков А. А., Ветров Н. З. Вакуумные дуговые источники плазмы. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 208 с.

3. Lafferty J. M. Vacuum arcs. Theory and applications. New York: Wiley, 1980. 372 p.

4. Барченко В. Т., Ветров Н. З., Лисенков А. А. Технологические вакуумно-дуговые источники плазмы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 243 с.

5. Cathode spots of vacuum arc discharges: Motion Control on the working surface / Yu. A. Bystrov, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, N. Z. Vetrov // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2015. Vol. 27, № 2. P. 22–25.

6. Месяц Г. А. Эктоны. Ч. 1. Взрывная эмиссия электронов. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 184 с.

7. Beilis I. I. Application of vacuum arc cathode spot model to graphite cathode // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1999. Vol. 27, № 4. P. 821–826.

8. Немчинский В. А. О причине перемещения катодного пятна вакуумной дуги и оценка скорости ретроградного движения в магнитном поле // *ЖТФ*. 1983. Т. 53, № 2. С. 241–250.

9. Мойжес В. Я., Немчинский В. А. Об аномальном направлении движения вакуумного пятна в магнитном поле // *Письма в ЖТФ*. 1979. Т. 5, № 4. С. 197–200.

10. Lisenkov A. A., Valuev V. P. Vacuum arc discharge on integrally cold cathode // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2011. Vol. 23, № 6. P. 32–36.

11. Барченко В. Т., Быстров Ю. А., Колгин Е. А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 332 с.

12. Кузнецов В. Г. Использование катодного пятна вакуумной дуги для поверхностной закалки металлов // *Вакуумная техника и технология*. 2009. Т. 19, № 2. С. 81–84.

13. Lisenkov A. A., Kostrin D. K., Pikus M. I. Vacuum arc deposition of carbon and carbon-based coatings // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 750–754.

14. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.

15. Pizzi A., Mittal K. L. Handbook of adhesive technology. Boca Raton: CRC Press, 2017. 644 p.

D. K. Kostrin

*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

## CONTROLLING THE OPERATION MODES OF A VACUUM-ARC PLASMA SOURCE

*The interest to the arc discharge in vacuum is caused by the possibility of its application for solving various technological problems: obtaining metal and combined coatings, as well as for surface treatment, permitting to remove surface contaminants. Emission in this type of discharge mainly occurs from the cathode spots, which are randomly moving on the cathode. The speed of spots movement, as well as their amount, depend on the surface properties and the material from which the cathode is made. The most important goal in the development of devices for the removal of surface contamination is the controlled nature of motion and reliable fixation of the cathode spots. The paper shows the possibility to control the mode of operation of the plasma source, which permits, by choosing its design and basic parameters, to switch it from the coatings deposition mode to the mode of cleaning the material surface. As a result of surface activation by plasma a passivating film is formed that protects the metal layer from corrosion, and the surface becomes highly adhesive.*

**Vacuum arc discharge, emission, cathode spots, coating deposition, surface cleaning**