

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**УДК 621.793
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-391-398>Поступила в редакцию 13.10.2021
Received 13.10.2021**Г. В. Марков, А. Т. Волочко, В. Г. Залесский, Н. Ю. Мельник***Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***КОРРЕЛЯЦИЯ РАДИУСА КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ МЕТАЛЛОВ И РАЗМЕРА ГЕНЕРИРУЕМЫХ МИКРОКАПЕЛЬ**

Аннотация. Получено простое соотношение для оценки радиуса катодного пятна вакуумной дуги чистых металлов, и на его основе установлена корреляционная связь между радиусом катодного пятна и размерами микрокапель, генерируемых катодным пятном, что позволяет находить пути их уменьшения в плазменном потоке, который формирует покрытия вакуумным электродуговым методом. Представлены результаты экспериментального исследования размеров микрокапель, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги, для сплава состава, в ат.-%: 68Al–8Cr–4Nb–20Si, в зависимости от силы тока вакуумной дуги i_d . Размер и количество капельной фазы на площади в 1 мм² поверхности покрытия определены с помощью программы ImageSP. В качестве исходных данных использовали микроструктуры покрытий с увеличением: $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$, $\times 1000$, $\times 1500$. Установлено, что больше всего генерируется микрокапель диаметром < 2 мкм, а меньше всего – диаметром > 10 мкм. Количество генерируемых микрокапель диаметром от 2 до 10 мкм незначительно зависит от i_d . Отмечено, что диаметр микрокапель сплава меньше, чем диаметр микрокапель, генерируемых катодным пятном на его компонентах, за счет того, что радиус катодного пятна на сплаве меньше, чем радиус катодного пятна на его чистых компонентах.

Ключевые слова: покрытия, микрокапли, катодное пятно, вакуумная дуга, катод

Для цитирования: Корреляция радиуса катодного пятна вакуумной дуги металлов и размера генерируемых микрокапель / Г. В. Марков [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 391–398. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-391-398>

Gennady V. Markov, Alexander T. Volochko, Vitali G. Zaleski, Natalia Yu. Melnik*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***CORRELATION OF RADIUS OF CATHODE SPOT OF VACUUM ARC OF METALS AND THE SIZE OF GENERATED DROPLETS**

Abstract. The simple relation to estimate the cathode spot radius of a vacuum arc of pure metals is obtained. On its basis, is established between the cathode spot radius and the size of droplets generated by the cathode spot a correlation. This enables to find ways to reduce droplets in the plasma flow, which forms coatings by the vacuum electric arc method. The paper presents the results of experimental study of the droplet sizes depending on the vacuum arc current i_d . The size and amount of the droplets on an area of 1 mm² of the coating surface are determined using the ImageSP program. As the initial data, the microstructures of the coatings are used with an increase of: $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$, $\times 1000$, $\times 1500$. The droplets have been generated by a cathode spot of a vacuum arc for the alloy of the composition, at.-%: 68Al–8Cr–4Nb–20Si. It is established that the number of droplets with a diameter of < 2 μm is generated most of all, and the number of droplets with a diameter > 10 μm is generated least of all. The number of generated droplets with a diameter from 2 to 10 μm slightly depends on the arc current i_d . It is noted that the diameter of the alloy droplet is smaller than the diameter of the droplets generated by the cathode spot on its components due to the fact that the radius of the cathode spot on the alloy is smaller than the radius of the cathode spot on its pure components.

Keywords: coating, droplets, cathode spot, vacuum arc, cathode

For citation: Markov G. V., Volochko A. T., Zaleski V. G., Melnik N. Yu. Correlation of radius of cathode spot of vacuum arc of metals on the size of generated droplets. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 391–398 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-391-398>

Введение. Среди получивших широкое распространение ионно-плазменных методов нанесения покрытий различного функционального назначения выделяется вакуумный электродуговой метод, или метод КИБ (конденсации с ионной бомбардировкой), позволяющий наносить многослойные композиционные покрытия из нитридов, карбидов металлов и сплавов. В этом методе покрытие формирует в основном поток положительных ионов, поставщиком которых является катодное пятно вакуумной дуги. По вакуумной дуге осуществляется перенос электрических зарядов 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 значения равны: $U \sim 10\text{--}30$ В, $U_k \sim 10\text{--}30$ В, а $U_a \sim 0,5\text{--}1,0$ В [2]. Визуально катодное пятно воспринимается как ярко светящаяся точка диаметром 50–500 мкм, которая перемещается по поверхности катода.

Классическая картина физических процессов, происходящих в единичном катодном пятне вакуумной дуги металлов и сплавов 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 с той же поверхности. Далее идет разлет пара и ускорение электронов в электрическом поле катодного падения потенциала U_k [1–10]. На некотором расстоянии от поверхности испарения электроны, ускоренные в электрическом поле U_k , начинают эффективно ионизировать испарившиеся атомы, в результате чего над поверхностью испарения образуется плазменное облако из положительных ионов и электронов со степенью ионизации 0,50–0,95, 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 металлов, и поддерживая разряд в целом. Меньшая часть положительных ионов под действием электронов вытесняется полем U_k от поверхности катода, вытягивается из плазменного облака и распространяется в объем вакуумной камеры, приобретая за счет газодинамического ускорения [8] энергии порядка 10–120 эВ [1, 6, 9], что значительно превышает величину eU_k , где e – заряд электрона.

Таким образом, поток ионов, идущий из образованного плазменного облака к поверхности катода в катодном пятне, не только разогревает эту поверхность, но и, ускоряясь в электрическом поле U_k , создает достаточно большое давление на эту поверхность. Так как температура на поверхности в катодном пятне близка к температуре кипения металла, из которого изготовлен катод, то неизбежно образуется ванна с жидким металлом. Вот на эту жидкую ванную и воздействует поток ионов с достаточно большим давлением, что приводит к выплескиванию жидкого металла в виде микрокапель, размер которых колеблется от 0,5 до 50 мкм [6]. Эти микрокапли, попадая на основание, на поверхность которого наносится покрытие, нарушают сплошность и структуру покрытия. Поэтому от микрокапель стараются избавиться, применяя различные технологические приемы [6], которые значительно удорожают процесс нанесения покрытия методом КИБ.

Целью работы являлось провести теоретический анализ тепловых процессов в катодном пятне вакуумной дуги сплавов, получить соотношение, связывающее радиус катодного пятна со свойствами сплава, экспериментально исследовать для сплава состава (в ат.%) 68Al–8Cr–4Nb–20Si зависимость радиуса микрокапель, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги, от силы тока дуги и выявить взаимосвязь между теоретически рассчитанным радиусом катодного пятна и радиусом микрокапель.

Методика исследования. Покрытия толщиной порядка 1–2 мкм наносили на кремниевые пластины на модифицированной установке ВУ-1Б при следующих условиях: давление аргона в камере $1 \cdot 10^{-1}$ Па, расстояние от катода до образца 300 мм, значения силы тока вакуумной дуги: 28, 42, 58, 78 А. Определение размера и количества капельной фазы на площади в 1 мм² поверхности покрытия проводили с помощью программы ImageSP. В качестве исходных данных использовали микроструктуры покрытий (рис. 1) с увеличением: $\times 100$ и $\times 200$ для подсчета микрокапель размером >10 мкм, $\times 500$ – 7–10 мкм, $\times 1000$ – 5–7 мкм и 2–5 мкм, $\times 1500$ – < 2 мкм. Микроструктуры образцов получены на металлографическом комплексе МИКРО-200.

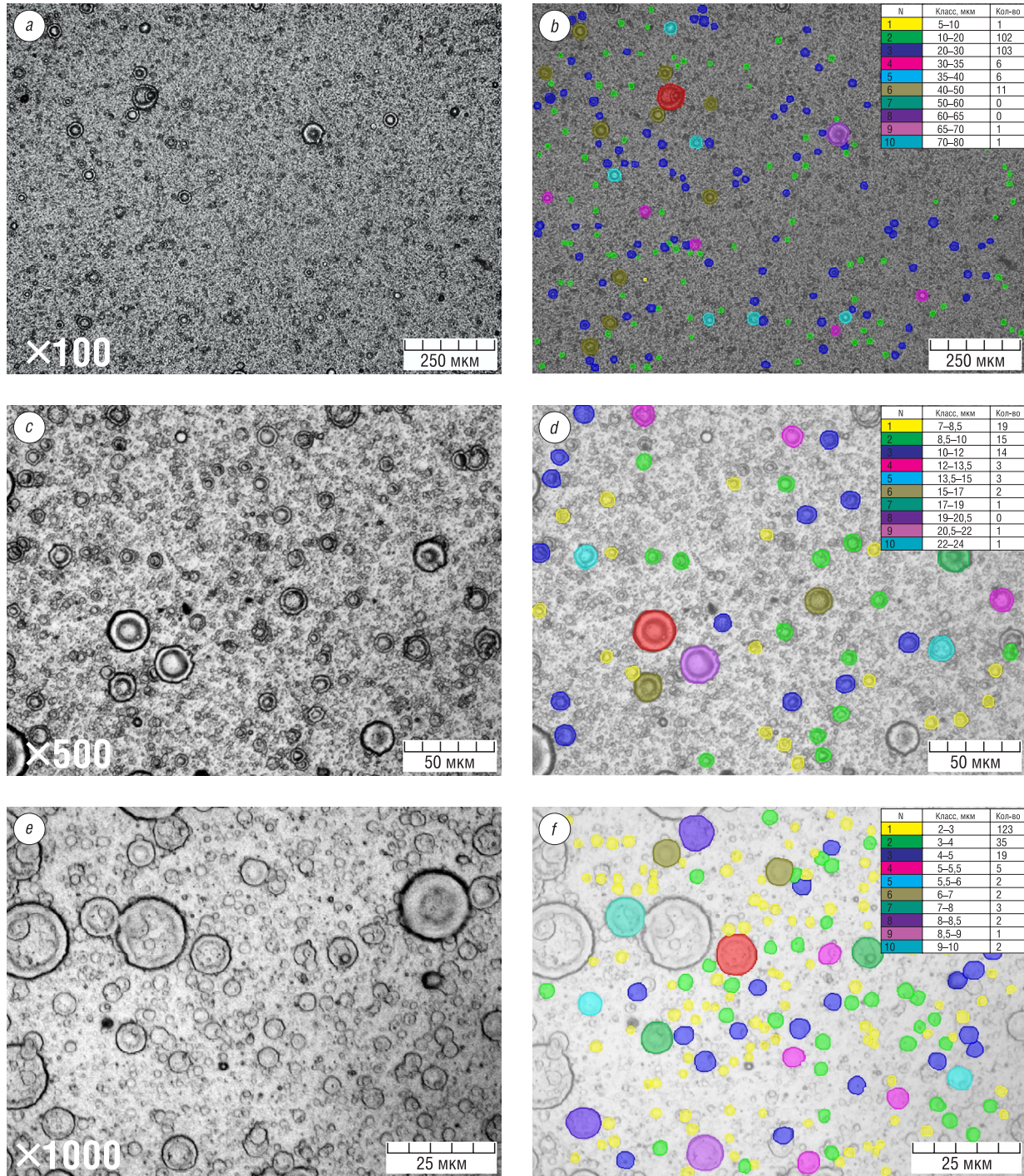


Рис. 1. Определение размера и количества капельной фазы: *a, c, e* – микроструктура покрытий; *b, d, f* – подсчет размера и количества капель в программе ImageSP

Fig. 1. Determination of the size and quantity of the droplet phase: *a, c, e* – microstructure of coatings; *b, d, f* – calculation of the size and number of droplets in the ImageSP program

Теоретический анализ процессов теплопереноса в катодном пятне. Одними из главных характеристик катодного пятна вакуумной дуги металлов является радиус катодного пятна R_k и температура поверхности катода T_k в катодном пятне. Это обусловлено тем, что именно эти характеристики определяют количество и размер микрокапель [1, 6], генерируемых катодным пятном в вакуумном методе нанесения покрытий. Обычно радиус катодного пятна мал по сравнению с характерными размерами самого катода и R_k изменяется в интервале 30–500 мкм [2, 4–6]. Расстояние между нижней частью плазменного облака в катодном пятне и поверхностью катода

не превышает 10–20 мкм [13]. Отсюда следует, что распределение температуры как на поверхности катодного пятна, так и в объеме катода, когда на площадь поверхности размером πR_k^2 падает тепловой поток q , в общем виде можно описать уравнением в цилиндрических координатах (z, r):

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) \pm Q, \quad (1)$$

где r, z – радиус и координата по оси, проходящей через центр катодного пятна соответственно, м; t – время, с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; Q – внутренние источники тепла, К/с.

Граничные и начальные условия таковы:

$$\text{при } t = 0 \text{ и } 0 \leq r \leq R_k \quad T_0 = \text{const}; \quad (2)$$

$$\text{при } t > 0 \quad \frac{dT}{dz} = \begin{cases} \frac{q}{\lambda}, & r \leq R_k \\ 0, & r > R_k \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности металла катода, который будем считать не зависящим от температуры, Вт·м⁻¹К⁻¹; T_0 – температура среды, К.

Примем, что катод занимает полупространство $z < 0$ и его поверхность с катодным пятном расположена в плоскости $z = 0$. Тогда граничные условия при $r \rightarrow \infty$ и $z \rightarrow \infty$ можно задать в виде

$$T(\infty, z) = T_0; \quad T(r, -\infty) = T_0. \quad (4)$$

Решение уравнения (1) в явном виде получить практически невозможно. Поэтому для получения аналитического выражения для оценки равновесного радиуса катодного пятна R_k , который определяется только процессами поступления тепла вследствие бомбардировки поверхности потоком ионов из области ионизации испаренных атомов и его потери в результате теплопроводности в объем катода, необходимо уже рассматривать следующее уравнение:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (5)$$

с граничными условиями (3) и (4).

Охлаждение катода, обусловленное тепловым излучением из катодного пятна, не оказывает большого влияния на его тепловой баланс в области пятна [6] и может не приниматься во внимание.

Решение уравнения (5), удовлетворяющее условиям (3) и (4), можно представить в виде разложения по собственным функциям оператора Лапласа [11]

$$T = T_0 + \int_0^{\infty} A(p) p J_0(rp) \exp(zp) dp, \quad (6)$$

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

Подставляя это выражение в граничное условие (3) и используя формулу для обратного преобразования Ханкеля [11], можно найти функцию $A(p)$. В результате уравнение (6) описывающее распределение температуры в объеме катода, принимает вид

$$T(r, z) = T_0 + \frac{qR_k}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{J_1(rp)}{p} J_0(rp) \exp(zp) dp, \quad (7)$$

где $J_1(rp)$ – функция Бесселя первого порядка.

Из (7) следует, что температура поверхности катода в пятне определяется соотношением

$$T(r, 0) = T_0 + \frac{qR_k}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{J_1(rp)}{p} J_0(rp) dp, \quad (8)$$

которое после вычисления интеграла [11] можно записать в следующей форме:

$$T(r, 0) = T_0 + \frac{2qR_k}{\pi\lambda} \times \begin{cases} E\left(\frac{r}{R_k}\right), & r \leq R_k \\ \frac{r}{R_k} \left[W\left(\frac{R_k}{r}\right) - \left(1 - \frac{r^2}{R_k^2}\right) E\left(\frac{R_k}{r}\right) \right], & r > R_k \end{cases}, \quad (9)$$

где $W\left(\frac{R_k}{r}\right)$ и $E\left(\frac{R_k}{r}\right)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

Из (9) следует, что температура в центре пятна и на ее краю определяется выражениями:

$$\begin{aligned} T(0, 0) &= T_0 + \frac{qR_k}{\lambda}, \\ T(R_k, 0) &= T_0 + \frac{2qR_k}{\pi\lambda}. \end{aligned} \quad (10)$$

Следовательно, при $T \gg T_0$ значения температуры T в пределах пятна отличается в $2/\pi$ раз. При этом среднее значение температуры T_{cp} в пятне равно

$$T_{cp} = T_0 + \frac{8qR_k}{3\pi\lambda}. \quad (11)$$

Исходя из представленной выше картины физических процессов, происходящих в катодном пятне вакуумной дуги, достаточно однозначно следует, что плотность потока тепла q , создаваемого потоком положительных ионов, возвращающихся на поверхность катода в катодном пятне, можно оценить из выражения

$$q = \frac{i}{\pi R_k^2} [(U_k + U_i) + n_a v_a m_a \eta], \quad (12)$$

где i – величина тока, создаваемого потоком ионов, А; U_i – потенциал ионизации атомов металла катода, В; $n_a v_a$ – плотность потока испаряющихся атомов металла катода, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; m_a – масса испаряющегося атома, кг; η – теплота испарения, Дж/кг.

Согласно закону Герца–Кнудсена [12] для испарения металлов

$$n_a v_a \approx \frac{P}{\sqrt{2\pi m_a k T_{cp}}}, \quad (13)$$

где P – давление пара, Па; k – постоянная Больцмана, Дж · К⁻¹.

Из полученных прежде проверенных данных [1–10] можно сделать вывод, что

$$\frac{i}{\pi R_k^2} \approx 0,9 n_a v_a e = \frac{0,9 P e}{\sqrt{2\pi m_a k T_{cp}}}, \quad (14)$$

где e – заряд электрона.

Тогда из (11)–(14) получаем

$$q = \frac{P}{\sqrt{2\pi m_a k T_{cp}}} [0,9 (U_k + U_i) e - m_a \eta], \quad (15)$$

следовательно,

$$R_k = \frac{1,3\lambda (T_{cp} - T_0) \sqrt{2\pi m_a k T_{cp}}}{P [0,9 (U_k + U_i) e - m_a \eta]}. \quad (16)$$

Результаты и обсуждение. Формула (16) позволяет оценить величину радиуса катодного пятна вакуумной дуги металлов R_k . При ее выводе сделаны несколько допущений, а величина средней температуры поверхности катода в катодном пятне T_{cp} является неоднозначной. Для того чтобы можно было взять определенное значение этой температуры, следует исходить из того факта, что подавляющее большинство исследователей [1–10] сходятся во мнении, что средняя температура поверхности катода в каждом катодном пятне вакуумной дуги металлов

Радиус катодного пятна R_k
Radius of the cathode spot R_k

Элемент	Ti	Al	Cu	Ni	Co	Fe	Mo
R_k , мкм	10	20	60	20	25	25	10

очень близка к температуре кипения металла. Поэтому в представленных далее в данной статье результатах оценки радиуса катодного пятна некоторых металлов принято, что температура поверхности катода в катодном пятне равна температуре кипения металла катода. Данные по катодному падению U_k взяты из [5, 10]. В таблице представлены результаты оценки величины R_k для некоторых чистых металлов.

Сравнивая вычисленные значения R_k с экспериментально измеренными по диаметрам микрокапель, генерируемых пятном, и приведенными в [2–10], можно заметить, что экспериментальные диаметры капель d_k примерно в 1,5–2,5 раза меньше рассчитанных значений $2R_k$.

Такое различие в размерах d_k и $2R_k$ можно объяснить следующим образом. При получении выражения (16) рассматривается стационарный режим пятна и в результате получено, что температура в центре пятна несколько выше, чем на краю (формула (10)). Это приводит к тому, что в центре пятна глубина ванны расплавленного металла, которая всегда присутствует в катодном пятне, несколько больше, чем по ее краям. Поток ионов, которые ускоряются в электрическом поле U_k , ударяется о поверхность жидкой ванны, создавая давление на расплавленный металл в несколько атмосфер, что приводит к разбрызгиванию жидкого металла из ванны. Однако весь жидкий металл удалить не удастся, так как этому мешает поверхностное натяжение жидкого металла, поэтому удаляется только его часть. Вследствие этого микрокапли, вылетающие из катодного пятна, имеют меньший диаметр, нежели диаметр самого пятна.

На экспериментальных пластинах с попавшими на их поверхность микрокаплями наблюдаются их расплюснутые кристаллизовавшиеся остатки, что может свидетельствовать лишь о том, что катодное пятно практически никогда не достигает своего стационарного состояния с радиусом катодного пятна R_k . Это происходит из-за постоянного перемещения катодного пятна на поверхности катода вследствие взаимодействия потоков ионов и электронов с внешними и собственными магнитными полями. Таким образом, можно сделать вывод, что между радиусом катодного пятна вакуумной дуги металлов и диаметром микрокапель, генерируемых этим пятном, существует определенная корреляционная зависимость: максимальный диаметр микрокапель примерно в 2–2,5 раза меньше диаметра катодного пятна, оцененного по формуле (16). Этот вывод сделан для катодного пятна вакуумной дуги чистых металлов.

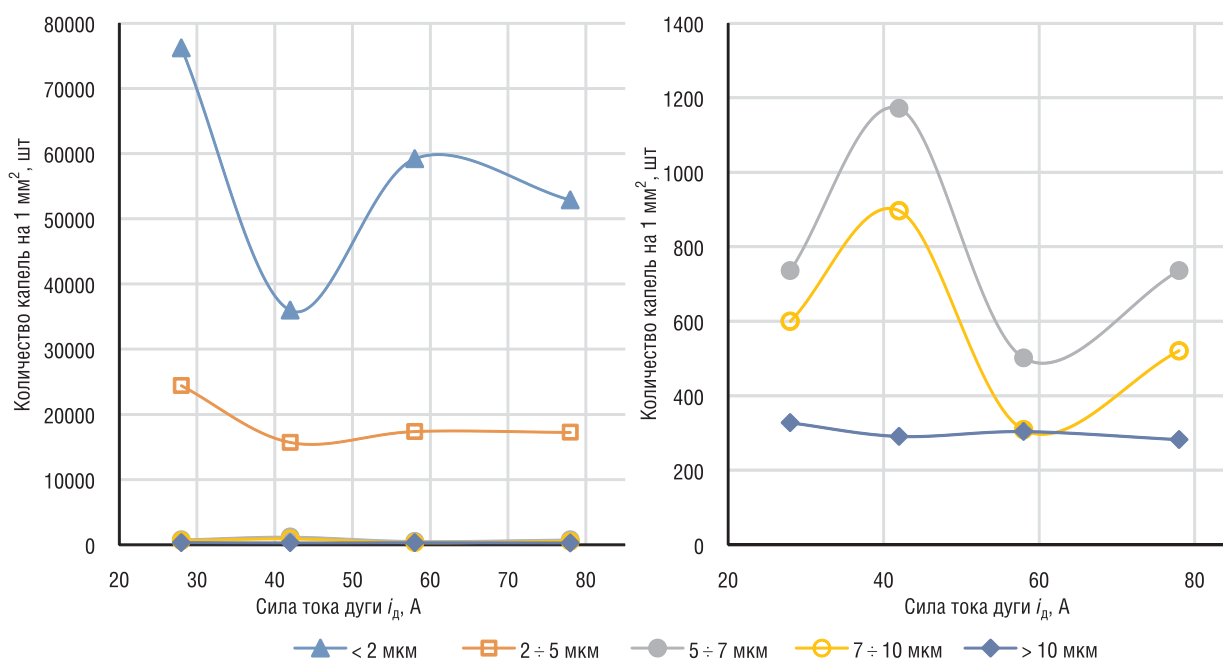


Рис. 2. Зависимость количества и размера капельной фазы покрытий от силы тока дуги
Fig. 2. Dependence of the number and size of the droplet phase of coatings on the arc current

Несколько иная корреляционная зависимость наблюдается для сплавов, особенно многокомпонентных. На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования размеров микрокапель, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги, для сплава следующего состава (в ат.%): 68Al–8Cr–4Nb–20Si, в зависимости от силы тока вакуумной дуги i_d . Из полученных данных следует, что больше всего генерируется количество микрокапель диаметром < 2 мкм. Меньше всего генерируется количество микрокапель диаметром > 10 мкм. Количество генерируемых микрокапель диаметром от 2 до 10 мкм практически не зависит от i_d .

Чтобы объяснить полученные и приведенные на рис. 2 экспериментальные результаты, обратимся к такой характеристике вакуумной дуги, как коэффициент электропереноса η . Величина η есть масса металла катода, безвозвратно испаряемая катодом из единичного катодного пятна в виде положительных ионов плазмы вакуумной дуги при прохождении через нее электрического заряда в 1 Кл. При этом в коэффициенте η не учитывается масса, теряемая катодом в виде микрокапель. По данной характеристике для чистых металлов имеется довольно много экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных данных [1–10, 13]. Что касается сплавов, то таких данных недостаточно [13], однако имеющиеся позволяют сделать заключение, что диаметр катодного пятна вакуумной дуги сплавов $d_{сп}$ меньше, чем диаметр катодного пятна $d_{к.п}$ его компонентов, то есть

$$d_{сп} < d_{к.п}. \quad (17)$$

Отсюда и следует, что катодное пятно на сплаве будет генерировать микрокапли меньшего размера, нежели если бы их генерировали чистые компоненты этого сплава. Кроме этого, на размер катодного пятна на сплавах оказывает существенное влияние фазовый состав сплава, размер различных включений, технология получения сплава и морфология поверхности катода. Все это, на наш взгляд, приводит к такому распределению микрокапель по размеру, которое представлено на рис. 2.

Заключение. Получено достаточно простое соотношение для оценки радиуса катодного пятна вакуумной дуги чистых металлов и на этой основе установлена корреляционная связь между радиусом катодного пятна и размерами микрокапель, генерируемых катодным пятном. Это позволяет находить пути их уменьшения в плазменном потоке, формирующем покрытия методом КИБ.

Приведены экспериментальные результаты исследования распределения диаметров микрокапель, генерируемых катодным пятном на сплав состава (в ат.%) 68Al–8Cr–4Nb–20Si. Отмечено, что диаметр микрокапель сплава меньше, чем диаметр микрокапель, генерируемых катодным пятном на его компонентах. Этот факт связан с тем, что радиус катодного пятна на сплаве меньше, чем радиус катодного пятна на его чистых компонентах.

Результаты исследования можно использовать при разработке конкретных технологий нанесения покрытий различного функционального назначения вакуумным электродуговым методом КИБ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект T21M-019.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, project T21M-019.

Список использованных источников

1. Мрочек, Ж. Л. Основы формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж. Л. Мрочек, Б. А. Эйзнер, Г. В. Марков. – Минск: Наука і тэхніка. 1991. – 152 с.
2. Вакуумные дуги. Теория и приложения / Дж. Кобайн [и др.]; под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 432 с.
3. Любимов, Г. А. Катодное пятно вакуумной дуги / Г. А. Любимов, В. И. Раховский // Успехи физ. наук. – 1978. – Т. 125, №4. – С. 665–706. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0125.197808c.0665>
4. Раховский, В. И. Физические основы коммуникации электрического тока в вакууме / В. И. Раховский. – М.: Наука, 1971. – 369 с.
5. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology: Fundamentals and Applications / ed. by R. L. Boxman, D. M. Sanders, Ph. J. Martin. – New Jersey: Noyes Publications, 1995. – 773 p.

6. Вакуумная дуга / под ред. И. И. Аксёнова. – Киев: Наук. думка, 2012. – 727 с.
7. Кессаев, И. Г. Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кессаев. – М.: Наука, 1968. – 253 с.
8. Месяц, Г. Л. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. Л. Месяц. – М.: Наука, 2000. – 424 с.
9. Аксёнов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксёнов. – Харьков: НИЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
10. Anders, A. Cathodic Arcs. From Fractal Spots to Energetic Condensation / A. Anders. – Springer, 2008. – 540 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1>
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. Ласковнѐв [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – Кн. 2: Обработка металлов давлением. – С. 364–370.

References

1. Mrochek Zh. L., Eizner B. A., Markov G. V. *Basics of Formation of Multicomponent Vacuum Electric Arc Coatings*. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1991. 152 p. (in Russian).
2. Lafferty J. M. (ed). *Vacuum Arcs: Theory and Applications*. Wiley, 1982. 432 p.
3. Lyubimov G. A., Rakhovskii V. I. Cathode spot of vacuum arc. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Soviet Physics-Uspeski*, 1978, vol. 21, no. 8, pp. 693–718. <https://doi.org/10.1070/pu1978v021n08abeh005674>
4. Rakhovskii V. I. *Physical Basis of Electric Current Communication in Vacuum*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 369 p. (in Russian).
5. Boxman R. L., Sanders D. M., Martin Ph. J. (eds.). *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology: Fundamentals and Applications*. New Jersey, Noyes Publications, 1995. 773 p.
6. Aksenov I. I. (ed.). *Vacuum Arc*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2012. 727 p. (in Russian).
7. Kessaev I. G. *Cathodic Processes of an Electric Arc*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 253 p. (in Russian).
8. Messyats G. L. *Ectons in Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, Arc*. Moscow, Nauka Publ., 2000. 424 p. (in Russian).
9. Aksenov I. I. *Vacuum Arc in Erosive Plasma Sources*. Kharkov, National Scientific Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”, 2005. 212 p. (in Russian).
10. Anders A. *Cathodic Arcs. From Fractal Spots to Energetic Condensation*. Springer, 2008. 540 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1>
11. Tranter C. J. *Integral Transforms in Mathematical Physics*. London, Methuen & Co., 1951. 126 p.
12. Ivanovskii M. N., Sorokin V. P., Subbotin V. I. *Evaporation and Condensation of Metals*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 287 p. (in Russian)
13. Laskovnyov A. P., Volochko A. T., Markov G. V., Ralko A. P., Misuno P. N., Makarova Zh. E. Ionization processes in the cathode spot of a vacuum arc of metals. *Sovremennyye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov. Kniga 2: Obrabotka metallov davleniem* [Modern Methods and Technologies for Creating and Processing Materials: Collection of Scientific Papers. Book 2: Forming Metals]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2013, pp. 364–370 (in Russian).

Информация об авторах

Марков Геннадий Васильевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь).

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochkoat@mail.ru

Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, директор института, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.zallesski@phti.by

Мельник Наталья Юрьевна – научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bukato_n@tut.by

Information about the authors

Gennady V. Markov – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus).

Alexander T. Volochko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochkoat@mail.ru

Vitali G. Zaleski – D. Sc. (Physics and Mathematics), Director, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.zallesski@phti.by

Natalia Yu. Melnik – Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bukato_n@tut.by