

ДУГОВА МЕТАЛІЗАЦІЯ

УДК 621.798.927

doi:10.31498/2225-6733.39.2019.213920

© Захарова І.В.¹, Роянов В.О.², Серенко О.М.³

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДДІЛЕННЯ РІДКОГО МЕТАЛУ З ТОРЦІВ ЕЛЕКТРОДІВ ПРИ ДУГОВІЙ МЕТАЛІЗАЦІЇ В УМОВАХ ВПЛИВУ ПУЛЬСУЮЧОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПОТОКУ

Серед технологій ресурсозбереження інтенсивно розвивається метод газотермічного напилення покриттів, а саме дугова металізація. Сучасний стан досліджень не повно відображає фізико-хімічні процеси, що відбуваються при дуговій металізації, що не дає можливості удосконалювати технологію й устаткування для цього методу, прогнозувати і впливати на хімічний склад і властивості покриттів. Основна проблема, яка виникає під час відновлення деталей методом дугової металізації, – підвищення якості покриттів за рахунок зниження негативного впливу кисню розпилювального потоку повітря. З метою зниження окисного впливу повітряно-розпилювального струменя на рідкий метал електродів раніше був представлений метод дугової металізації із застосуванням пульсуючого розпилювального потоку, отриманий шляхом введення додаткового елемента – клапана пульсатора в розпилювальну систему електродугового металізатора. Розглянуто характер сил, що діють на рідкий метал електродів при плавленні електричною дугою, без урахування впливу розпилювального потоку. З урахуванням даних, наведених в роботах В.І. Дятлова, Б.Є. Патона, представлена діаграма утворення рідкого металу на катоді і аноді в залежності від параметрів режиму електричної дуги без урахування впливу розпилювального потоку. Під впливом пульсуючого розпилювального потоку крапля розплавленого металу електродів буде набувати напівеліпсоїдну форму. Важливим є вплив і розподіл сил, що діють на краплю такої форми, та умови відриву краплі з торців електродів. У роботі був проведений аналітичний розрахунок сил, що діють на краплю напівеліпсоїдної форми при дуговій металізації з пульсуючим розпилювальним струменем.

Ключові слова: розпилювальний потік, аеродинамічна сила, сила поверхневого натягу, напівеліпсоїдна крапля.

Захарова И.В., Роянов В.А., Серенко А.Н. Исследование процесса отделения жидкого металла с торцов электродов при дуговой металлизации в условиях воздействия пульсирующего распыляющего потока. Среди технологий ресурсосбережения интенсивно развивается метод газотермического напыления покрытий, а именно дуговая металлизация. Современное состояние исследований не полно отражает физико-химические процессы, происходящие при дуговой металлизации, что не дает возможности совершенствовать технологию и оборудование для этого метода, прогнозировать и влиять на химический состав и свойства покрытий. Основная проблема, которая возникает при восстановлении деталей методом дуговой металлизации, – повышение качества покрытий за счет снижения негативного воздействия кислорода распыляющего потока воздуха. С целью снижения окислительного воздействия воздушно-распыляющей струи на жидкий ме-

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-3492-0134, zakharovaiv75@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-0899-173X

³ канд. техн. наук, професор

малл электродов ранее был представлен метод дуговой металлизации с применением пульсирующего распыляющего потока, полученный путем введения дополнительного элемента – клапана пульсатора в распылительную систему электродугового металлизатора. Рассмотрен характер сил, действующих на жидкий металл электродов при плавлении электрической дугой, без учета влияния распыляющего потока. С учетом данных, приведенных в работах В.И. Дятлова, Б.Е. Патона, представлена диаграмма образования жидкого металла на катоде и аноде в зависимости от параметров режима электрической дуги без учета влияния распыляющего потока. Под влиянием пульсирующего распыляющего потока капля расплавленного металла электродов будет приобретать полуэллипсоидную форму. Важно влияние и распределение сил, действующих на каплю такой формы, и условия отрыва капли с торцов электродов. В работе был проведен аналитический расчет сил, действующих на каплю полуэллипсоидной формы при дуговой металлизации с пульсирующей распылительной струей.

Ключевые слова: распыляющий поток, аэродинамическая сила, сила поверхностного натяжения, полуэллипсоидная капля.

I.V. Zakharova, V.O. Royanov, O.M. Serenko. The analysis of the process of separation of liquid metal from the electrode ends at arc metallization within the conditions of a pulsating spraying flow. Among the resource-saving technologies, the method of gas-thermal spraying of coatings, namely arc metallization, is being developed intensively. The current state of research does not fully reflect the physical and chemical processes that occur during arc metallization, which does not allow to improve the technology and equipment for this method, to predict and influence the chemical composition and properties of coatings. The main problem that arises when parts are restored by the arc metallization method is to improve the quality of coatings by reducing the negative impact of oxygen in the spraying airflow. To reduce the oxidizing effect of air-spraying flow on the liquid metal of electrodes the method of arc metallization utilizing the pulsating spraying flow, obtained by introducing an additional element – a valve of the pulsator into the spray system of electroarcmetalizer, was previously introduced. The nature of forces acting on the liquid metal of electrodes at melting by an electric arc without consideration of spraying flow is reviewed. Taking into account the findings presented in the works of V.I. Dyatlov, B.E. Paton, a diagram of liquid metal formation on the cathode and anode depending on the parameters of the electric arc mode without considering the impact of the spraying flow is presented. Under the impact of a pulsating spraying flow, a drop of molten metal of the electrodes will turn into a half-ellipsoid shape. The impact and distribution of forces acting on a drop of such shape and conditions of separation of a drop from the electrode ends are important. Analytical calculation of forces acting on a drop of semi-ellipsoid form during arc metallization with a pulsating spraying flow was carried out in this paper.

Keywords: spraying flow, aerodynamic force, surface tension force, spherical drop, semi-ellipsoid drop.

Постановка проблеми. Вплив пульсуючого потоку повітряно-розпилювального струменя на перенесення електродного металу, процеси формування крапель підчас впливу пульсуючого потоку повітря при дуговій металізації, аналіз сил, що діють на краплю, умови відриву краплі з поверхні електрода з урахуванням пульсацій потоку повітря.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На підставі робіт з теорії переносу електродного металу при зварюванні [1, 2] в зв'язку зі схожістю процесу плавлення, розглядаються питання перенесення електродного металу при електродуговій металізації. Ряд робіт науковців спрямований на вивчення процесів формування крапель рідкого металу, але розглядаються, в основному, краплі сферичної форми та діюча на них сила аеродинамічного опору з боку повітряного струменя, або краплі у формі «язика», які мають велику вірогідність дроблення та переходу у вигляд сферичних.

Мета роботи – провести аналітичний розрахунок сил, що діють на краплю напівеліпсоїдної форми при дуговій металізації з пульсуючим розпилювальним струменем.

Виклад основного матеріалу. З метою уточнення основних закономірностей плавлення електродів при електродуговій металізації з пульсуючим розпилювальним потоком повітря, обладнання та технологія для проведення якого були представлені авторами раніше [3-7], запропонована математична модель процесу плавлення електродів при пульсуючій дії розпилювального потоку із застосуванням програмного забезпечення системи Mathcad. Базова схема моделювання представлена на рис. 1.

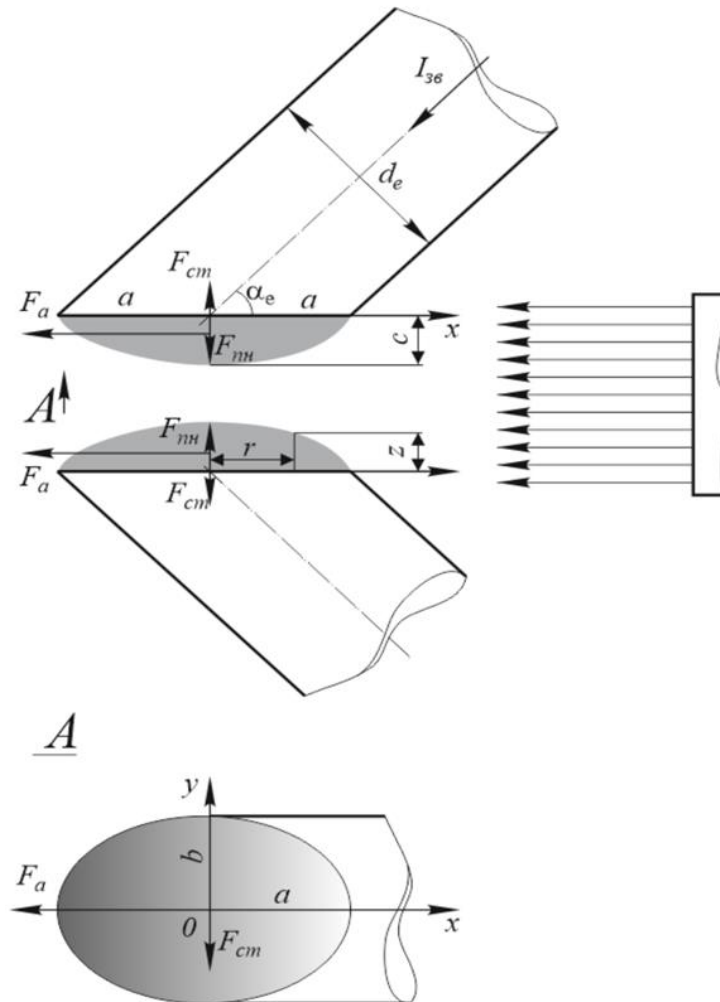


Рис. 1 – Схема дії основних сил на краплю напівеліпсоїдної форми: F_a – аеродинамічна сила; $F_{н.н.}$ – сила поверхневого натягу; F_{cm} – електромагнітна сила, a , b , c – піввісь еліпсоїда

Проведено аналітичний розрахунок сил, що діють на краплю напівеліпсоїдної форми, при дуговій металізації пульсуючим розпилювальним струменем.

Масу розплавленого металу одного електроду, масу і об'єм рідкої краплі за час імпульсу і паузи при обліку втрат на розбризування, чад визначаємо з виразу:

$$m_e = \Delta l \cdot F_e \cdot \gamma, \quad (1)$$

де m_e – маса розплавленого електроду, г; Δl – довжина ділянки плавлення електроду, см²; F_e – площа поперечного перерізу електроду, см²; γ – щільність металу, г/см³.

Тоді маса краплі рідкого металу буде:

$$m_k = \alpha_n \cdot m_e, \quad (2)$$

де m_k – маса краплі, г; $\alpha_n = 0,92$ – коефіцієнт розплавлення металу з урахуванням втрат на розбризування, чад, тощо.

Обсяг краплі рідкого металу дорівнює:

$$V_k = \frac{m_k}{\gamma_{ж}}, \quad (3)$$

де V_k – об’єм краплі; $\gamma_{ж}$ – щільність металу в рідкому стані, $\gamma_{ж} = 7,0 \cdot 10^3$, кг/м³.

Геометричні розміри напівосей еліпсоїда a , b , залежать від діаметра електрода і кута α_e . Величину третьої напіввісі c визначимо через обсяг розплавленого електрода, відповідно:

$$a = \frac{d_e}{2 \sin(\alpha_e)},$$

$$b = \frac{d_e}{2},$$

$$c = \frac{1,5V_k}{\pi a \cdot b},$$

де α_e – кут нахилу електрода, рад.

Визначимо розмір об’ємно-еквівалентного діаметру краплі, що утворюється за час дії імпульсу і паузи

$$d_k = \sqrt{\frac{6m_e}{\pi \cdot \gamma_{ж}}}. \quad (4)$$

Для знаходження сили поверхневого натягу, що діє в протилежному напрямку потоку повітря, необхідно знати довжину умовного периметра краплі, що «сидить» на електроді для напівеліпсоїдної L_{el} і шарової форми $\xi = \frac{a-b}{a+b}$, тоді

$$L_{el} = \pi \left[(a+b) \frac{(64-3\xi^4)}{(64-16\xi^2)} \right], \quad (5)$$

де L_{el} – довжина умовного периметру краплі, для випадку коли $F_{nn} = \sigma \cdot L_{el}$; $\sigma = 12 \cdot 10^{-2}$ Н/м – коефіцієнт поверхневого натягу.

З урахуванням отриманих виразів уточнюємо схему дії сил для випадку утворення напівеліпсоїдної краплі рідкого металу (рис. 2).

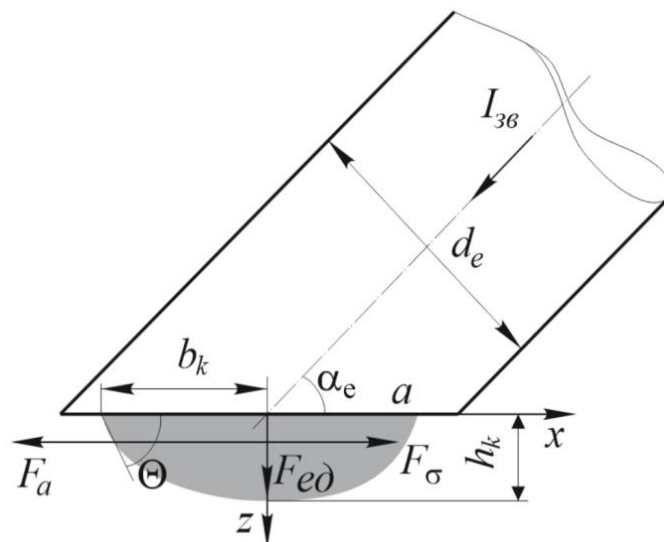


Рис. 2 – Уточнена схема дії сил в процесі утворення напівеліпсоїдної краплі рідкого металу: h_k – висота краплі; b_k – ширина краплі

Визначимо характер утворення напівеліпсоїдної краплі рідкого металу для пульсуючого потоку при вуглі змочування $\theta < \pi/2$ і $\theta > \pi/2$.

Задаємо статичний кут змочування для краплі:

$$\theta = 40 \cdot \frac{\pi}{180}, \text{ рад} \quad (6)$$

Для знаходження довжини кола контуру плями краплі визначимо розміри, зазначені на рисунку $b_k = 0,5d_k \cdot \sin(\theta)$; $h_k = 0,5d_k (1 - \cos(\theta))$.

Довжина кола контуру плями: $L_\sigma = (\pi \cdot d_e)$, якщо $2b_k > d_e$, у протилежному випадку – $L_\sigma = (\pi \cdot 2b_k)$.

Сила поверхневого натягу визначається з виразу:

$$F_\sigma = \sigma \cdot L_\sigma. \quad (7)$$

Визначимо площу перерізу краплі S_c , на яку діє швидкісний напір повітря

$$S_c = \frac{0,5d_k}{2} (\beta_1 - \sin(\beta_1)), \quad (8)$$

де $\beta_1 = 2a \cos\left(1 - \frac{h_k}{0,5d_k}\right)$ – центральний кут для окружності краплі.

Визначимо величину і характер дії аеродинамічної сили для напівеліпсоїдної краплі:

$$F_a(t) = C_d \cdot S_e \cdot (W_{1d(t)})^2,$$

де C_d – коефіцієнт опору краплі, $C_d = 0,5$;

$$S_e = \frac{1}{2} \pi \cdot c \cdot b.$$

Наведені вирази дозволили уточнити вплив сили поверхневого натягу і аеродинамічної сили на процес формування напівеліпсоїдної краплі, що утворюється в результаті дії розпилювального потоку при дуговій металізації з пульсуючим розпилювальним струменем повітря.

Висновки

Наведено розрахунки для визначення параметрів краплі рідкого металу, яка утворюється на торцях електродів, при впливі аеродинамічної сили і сили поверхневого натягу в процесі використання пульсуючого розпилювального потоку.

Перелік використаних джерел:

1. Дятлов В.И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В.И. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники. – Киев : Техника, 1964. – С. 167-182.
2. Патон Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Б.Е. Патон, Г.И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
3. Royanov V. Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metallization / V. Royanov, I. Zakharova, E. Lavrova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, № 5 (90). – Pp. 18-24. – Mode of access: DOI: [10.15587/1729-4061.2017.118252](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118252).
4. Роянов В.А. Снижение воздействия кислорода на жидкий металл при электродуговом напылении пульсирующей струей воздуха / В.А. Роянов, И.В. Захарова, Н.С. Крючков // World Science. – 2019. – № 5 (45), vol. 1. 5 (45). – Pp. 13-21. – Mode of access: DOI: [10.31435/rsglobal_ws/31052019/6508](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31052019/6508).
5. Захарова І.В. Вплив пульсуючого розпилювального потоку на ефективність використання електродів, при утворенні покриттів / І.В. Захарова, В.О. Роянов, М.С. Крючков // Topical issues of the development of modern science : матеріали 4 Міжн. наук.-практ. конф. (11-13 грудня 2019 р.; Софія, Болгарія). – С. 88-94.
6. Захарова І.В. Вплив частоти пульсацій на міцність зчеплення покриття з основою / І.В. Захарова, В.О. Роянов, М.С. Крючков // Science and society : 16th International conference (27 December 2019; Hamilton, Canada). – Pp. 6-11.
7. Роянов В.А. Энерго и ресурсосбережение при электродуговом напылении покрытий : монография / В.А. Роянов, И.В. Захарова. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», ПрАТ «Приазовский рабочий», 2018. – 143 с.

References:

1. Diatlov V.I. Elementy teorii perenosa elektrodnoho metalla pri elektrodugovoi svarke [Elements of the theory of transfer of electrode metal in electric arc welding]. *Novye problemy svarochnoi tekhniki – New problems of welding equipment*, 1964, pp. 167-182. (Rus.)
2. Paton B.E., Leskov G.I. *Tekhnologiya elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem* [Electric fusion welding of metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 768 p. (Rus.)
3. Royanov V., Zakharova I., Lavrova E. Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metallization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 6, no. 5 (90), pp. 18-24. doi: **10.15587/1729-4061.2017.118252**.
4. Royanov V.A., Zakharova I.V., Kriuchkov N.S. Snizhenie vozdeistviia kislороda na zhidkii metall pri elektrodugovom napylenii pul'siruiushchei struei vozdukha [Reducing the effect of oxygen on liquid metal during electric arc spraying with a pulsating air jet]. *World Science*, 2019, no. 5 (45), vol. 1. 5 (45), pp. 13-21. doi: **10.31435/rsglobal_ws/31052019/6508**. (Rus.)
5. Zakharova I.V., Royanov V.A., Kriuchkov N.S. Vpliv pul'suiuchogo rozpiliuval'nogo potoku na effektivnist' vikoristannia elektrodov, pri utvorenni pokrittiv. *Materiali 4 Mizhn. nauk.-prakt. konf. «Topical issues of the development of modern science»* [The effect of pulsating spray flow on the efficiency of the use of electrodes in the formation of coatings. Proceedings of the 4th Int. Sci.-Pract. Conf. «Topical issues of the development of modern science»]. Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 88-94. (Ukr.)
6. Zakharova I.V., Royanov V.A., Kriuchkov N.S. Vpliv chastoti pul'satsii na mitsnist' zchepлення pokrittia z osnovoiu. *Materiali 16 Mizhn. konf. «Science and society»* [Influence of pulsation frequency on the adhesion strength of the coating to the substrate. Proceedings of the 16th Int. Conf. «Science and society»]. Hamilton, Canada, 2019, pp. 6-11. (Ukr.)
7. Royanov V.A., Zakharova I.V. *Energo i resursoberezhenie pri elektrodugovom napylenii pokrytii: monografiia* [Energy and resource saving in electric arc spraying of coatings: monography]. Mariupol, SHEE «PSTU», Priazovskii rabochii Publ., 2018. 143 p. (Rus.)

Рецензент: В.І. Щетиніна
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.10.2019