

УДК 537.523.4

DOI: 10.30987/article\_5d6cbe42af6c79.15380930

С.А. Пячин, О.И. Каминский, А.В. Беля, Б.Я. Мокрицкий

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛОВ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ

Разработана модель переноса металлов между анодом и катодом, имеющими форму цилиндра, при электроискровом легировании. Установлено влияние размеров электродов, соотношения между эрозией анода и катода на коэффициент осаждения

металлов, кинетику изменения масс электродов и коэффициент массопереноса.

**Ключевые слова:** электрический разряд, электроискровое легирование, электроды, осаждение, коэффициент массопереноса.

S.A. Pyachin, O.I. Kaminsky, A.V. Belya, B.Ya. Mokritsky

## SIMULATION OF METAL TRANSFER BETWEEN CYLINDRICAL ELECTRODES AT ELECTROSPARK ALLOYING

The work is dedicated to the simulation of the processes of erosion and electrode metal transfer at coating formation by an electrospark alloying method. Anode is a cylindrical rod, and cathode – a disk. During discharge pulses the erosion takes place both in anode material, and in cathode material. The anode moves in a spiral along a cathode surface. There are calculated the coefficients of precipitation equal to the probability of metal emitted from the surface of one electrode and falling onto the surface of the opposite electrode. They are constant close to the central cathode axis, but at the anode approach to the cathode end a coefficient of anode metal precipitation on a cathode decreases, a coefficient of cathode metal precipitation

on an anode increases. The rates of anode erosion and cathode weight increase when the mass ratio of eroded substance of anode and cathode increases in the course of one discharge. When this ratio is equal to 5, a coefficient of mass transfer achieves 0.8-0.9 it tells of small substance loss during its transfer between electrodes. The model developed is useful for the parameter estimate of mass transfer between cylindrical electrodes at electrospark processing taking into account their dimensions and paths of anode motion.

**Key words:** electric discharge, electrospark alloying, electrodes, precipitation, coefficient of mass transfer.

### Введение

Электроискровое легирование - это метод улучшения физико-механических свойств поверхностей металлов и сплавов за счет воздействия коротких разрядных импульсов [1]. Быстрый ввод энергии во время разряда сопровождается электрической эрозией - разрушением поверхности электродов. Металл испаряется в поверхностных областях, близко расположенных к плазменному каналу, а нижележащие слои расплавляются. Жидкий металл выбрасывается под действием давления пара и плазмы разряда в форме шарообразных частиц. Помимо этого, из-за возникающих термомеханических напряжений в материалах электродов часто образуются трещины [2-4]. В результате многократных циклов нагрева и охлаждения металлов от их поверхности откалываются твердофазные

микрочастицы. Таким образом, материал электродов может эродировать в парообразном, жидком и твердом состояниях.

Расстояние между электродами небольшое - менее 1 мм, поэтому часть материала, эродированного во время разряда, осаждается на поверхность противоположного электрода, а другая часть улетает. Величина электрической эрозии анода, как правило, превышает эрозию катода, поэтому количество вещества, переносимого с анода на катод, больше, чем в обратном направлении [5-7]. При многократно повторяющемся разрядном воздействии на поверхности катода в результате формируется модифицированный поверхностный слой - электроискровое покрытие, которое состоит преимущественно из анодного материала.

Эффективность электроискрового легирования оценивают по величине привеса катода  $\Delta M_k$  по сравнению с эрозией анода  $\Delta M_a$  [8]. Для этого вычисляют коэффициент массопереноса  $K_M = \Delta M_k / |\Delta M_a|$ . Чем меньше потери вещества при массопереносе с анода на катод, тем лучше. Коэффициент массопереноса зависит от многих факторов: теплофизических свойств материалов электродов, мощности и длительности разрядных импульсов, частоты их повторения, состава и давления газа [9]. Кроме того, он может изменяться в зависимости от размеров электродов, скорости и траек-

тории движения анода. Поскольку этот вопрос слабо изучен, требовалось оценить влияние геометрических параметров электродов на процесс осаждения электроискровых покрытий. В нашей предыдущей работе [10] определены характеристики массопереноса между электродами с квадратными сечениями. Целью данной работы являлось моделирование процессов переноса вещества между электродами цилиндрической формы для установления кинетических зависимостей изменения масс электродов и расчета коэффициента массопереноса.

### Математическая модель

Предлагаемая модель описывает эрозию вещества под действием искровых разрядов и перенос его с одного электрода на другой. При воздействии разрядов необходимо учитывать, что анод движется вдоль поверхности катода по спирали от центра катода. Расстояние от центра катода до места разряда  $r_{pk}$ , расстояние от центра анода до места разряда  $r_{pa}$  и расстояние между центрами анода и катода  $r_c$  связаны между собой выражением  $\vec{r}_c + \vec{r}_{pa} = \vec{r}_{pk}$ . При этом  $|\vec{r}_c| < R_k$ ,  $|\vec{r}_{pk}| < R_k$ ,  $|\vec{r}_{pa}| < R_a$ .

Для расчета коэффициента осаждения, равного вероятности попадания ме-

талла, эродированного с поверхности одного электрода во время разряда, на противоположный электрод, определялось отношение площади тени, создаваемой близлежащей плоскостью противоположного электрода на полусфере радиусом  $R$ , к площади этой полусферы при условии, что источник света находится в месте возникновения разряда и удален на расстояния  $r_{pk}$  и  $r_{pa}$  от центров катода и анода соответственно. Длина межэлектродного промежутка равна  $L$ . Площадь тени от анода при расположении источника света на поверхности катода рассчитывается как

$$S_{sh} = 2 \int_0^\pi \int_0^{\rho_{max}} \frac{\rho R}{\sqrt{\rho^2 + R^2}} d\rho d\varphi, \quad (1)$$

где  $\rho_{max} = \frac{R(R_a^2 - r_{pa}^2)}{\sqrt{(R_a^2 - r_{pa}^2)^2 + L^2(\sqrt{R_a^2 - r_{pa}^2 \sin^2 \varphi} - r_{pa} \cos \varphi)^2}}$  - радиальная координата точек пересечения полусферы с конусом, охватывающим границу нижней плоскости анода, с вершиной в месте расположения светового источника. Интегрирование (1) по первой переменной приводит к следующему виду:

$$S_{sh} = 2\pi R^2 - 2R^2 L \int_0^\pi \frac{\sqrt{R_a^2 - r_{pa}^2 \sin^2 \varphi} - r_{pa} \cos \varphi}{\sqrt{(R_a^2 - r_{pa}^2)^2 + L^2(\sqrt{R_a^2 - r_{pa}^2 \sin^2 \varphi} - r_{pa} \cos \varphi)^2}} d\varphi.$$

В итоге коэффициент осаждения материала катода на анод во время одного разряда можно найти из выражения

$$p_k = \frac{S_{sh}}{2\pi R^2} = 1 - \frac{L}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{R_a^2 - r_{pa}^2 \sin^2 \varphi} - r_{pa} \cos \varphi}{\sqrt{(R_a^2 - r_{pa}^2)^2 + L^2(\sqrt{R_a^2 - r_{pa}^2 \sin^2 \varphi} - r_{pa} \cos \varphi)^2}} d\varphi.$$

Вероятность попадания материала анода на катод во время одного разряда определяется аналогично:

$$p_a = \frac{S_{sh}}{2\pi R^2} = 1 - \frac{L}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{R_k^2 - r_{pk}^2 \sin^2 \varphi - r_{pk} \cos \varphi}}{\sqrt{(R_k - r_{pk})^2 + L^2 (\sqrt{R_k^2 - r_{pk}^2 \sin^2 \varphi - r_{pk} \cos \varphi})^2}} d\varphi.$$

Вероятности осаждения металлов определяются длиной межэлектродного промежутка, радиусами электродов и расстояниями от места возникновения разряда до осей анода и катода. Следует также учитывать, что разряды могут быть инициированы только на участках, где перекрываются поверхности анода и катода (показаны темно-серым цветом на рис. 1). Площадь перекрытия электродов уменьшается по мере приближения анода к краю катода, когда  $r_c < R_k - R_a$ .

При электроискровом легировании невозможно контролировать точное место возникновения разряда и трудно предсказать, какие микровыступы соприкоснутся при последующем приближении анода к катоду [5]. Поэтому следует учитывать

$$\tilde{p}_a(x_a, y_a) = \frac{1}{S_{ov}(x_a, y_a)} \int_{S_{ov}(x_a, y_a)} p_a ds, \quad \tilde{p}_k(x_a, y_a) = \frac{1}{S_{ov}(x_a, y_a)} \int_{S_{ov}(x_a, y_a)} p_k ds.$$

Масса катода во время каждого разряда уменьшается из-за электрической эрозии ( $-m_{ki}$ ) и возрастает за счет поступления материала с противоположного электрода - анода ( $m_{ai} \tilde{p}_a(x_a, y_a)$ ). Аналогичные явления происходят на аноде: масса анода во время каждого разряда уменьшается на величину  $-m_{ai}$  и возрастает за счет поступления материала с катода ( $m_{ki} \tilde{p}_k(x_a, y_a)$ ).

Если энергия, длительность и частота разрядов в процессе ЭИЛ не изменяются, то можно предположить, что величины  $m_{ai}$

### Результаты расчетов

Расчеты проведены при различных соотношениях между радиусами анода и катода:  $R_a/R_k = 1/5; 1/15; 3/5; 3/15$  мм/мм. Длина межэлектродного промежутка  $L = 0,5$  мм. Частота разрядов - 10 Гц. Константу  $\alpha$  задавали равной 1,5, 2, 3, 5, сохраняя постоянным значение  $m_k = 0,001$  мг. Цилиндрический анод движется вдоль поверхности катода по траектории в форме спирали, начиная от центра до края катода. Расстояние между витками спирали - 1 мм.

средние значения коэффициентов осаждения на площади перекрытия электродов  $S_{ov}$ :

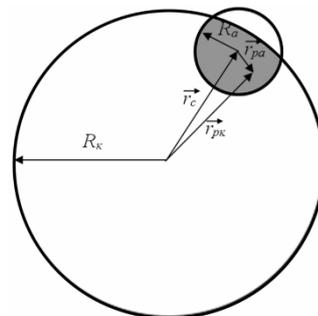


Рис. 1. Определение расстояний от центров катода и анода до точки разряда

и  $m_{ki}$  постоянны. Используя отношение масс эродированного вещества анода и катода за один разряд,  $\alpha = \frac{m_{ai}}{m_{ki}} = const$ , выражение для коэффициента массопереноса  $K_m$  можно записать следующим образом:

$$K_i = \frac{\Delta M_{\dot{e}}}{\Delta M_a} = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha \tilde{p}_a(x_{ai}, y_{ai}) - 1)}{\sum_{i=1}^N (\tilde{p}_e(x_{ai}, y_{ai}) - \alpha)}$$

При этом линейная скорость передвижения анода  $v = 10$  мм/с. Для вычислений согласно вышеописанной модели была создана программа на языке Си++.

В результате расчетов было установлено, что коэффициенты осаждения вещества анода на катод больше коэффициентов осаждения с катода на анод (рис. 2). Когда анод находится в центральной области катода, коэффициенты  $\tilde{p}_a$  и  $\tilde{p}_e$  постоянны в разных участках этой области, но

по мере приближения к краю катода  $\tilde{p}_a$  уменьшается, а  $\tilde{p}_e$  возрастает. В том случае, когда катод имеет радиус 5 мм, максимальное значение  $\tilde{p}_a = 0,9$ , а когда  $R_k =$

15 мм,  $\tilde{p}_a = 0,98$ , при этом значение  $\tilde{p}_e$  для обоих случаев практически одинаково и равно 0,42.

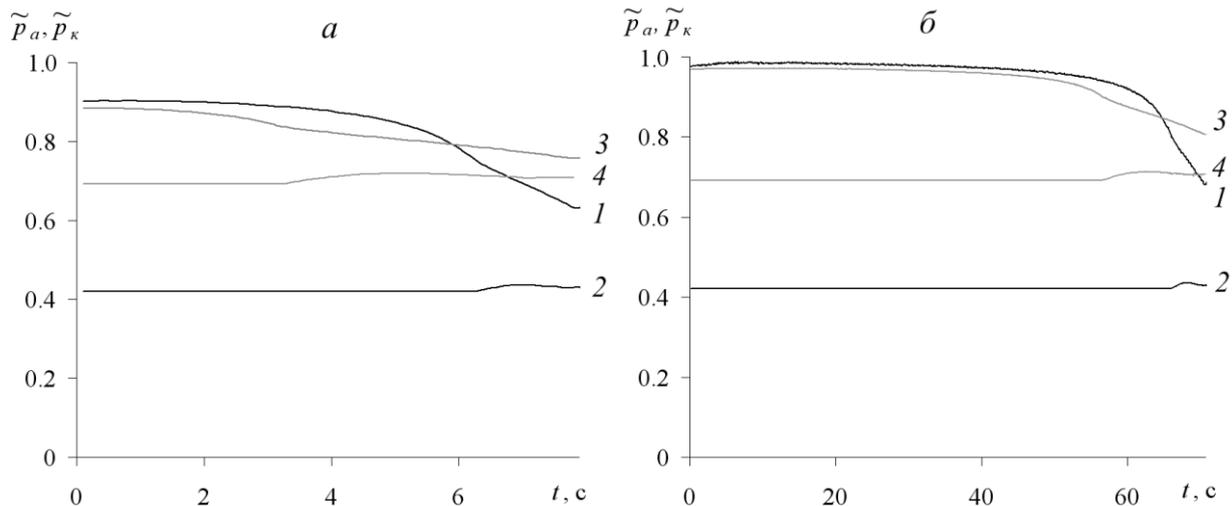


Рис. 2. Средние значения коэффициентов осаждения металлов электродов за один проход анода по спирали вдоль поверхности катода: а - радиус катода 5 мм; б - радиус катода 15 мм; 1 -  $\tilde{p}_a$ ,  $R_a = 1$  мм;

2 -  $\tilde{p}_e$ ,  $R_a = 1$  мм; 3 -  $\tilde{p}_a$ ,  $R_a = 3$  мм; 4 -  $\tilde{p}_e$ ,  $R_a = 3$  мм

Кинетические кривые изменения масс анода и катода для разных соотношений  $R_a/R_k$  и  $\alpha$  показаны на рис. 3. При увеличении времени электроискрового легирования масса анода уменьшается, а масса катода увеличивается. Графики временных зависимостей  $\Delta m(t)$  имеют вид практически прямых линий, исходящих из нулевого значения. Небольшие перегибы линий при времени  $t = 10$  с (рис. 3а, в) и  $t = 100$  с (рис. 3б, г) вызваны изменением коэффициентов осаждения  $\tilde{p}_a$  и  $\tilde{p}_e$ . Когда  $\alpha$  повышается с 1,5 до 5, скорости эрозии анода и привеса катода повышаются: при осаждении покрытий на катод радиусом 5 мм в течение 3 проходов за 23 секунды рост  $\Delta m_a$  составляет 4,3 раза (для  $R_a = 1$  мм) и 5,5 раза (для  $R_a = 3$  мм), а  $\Delta m_k$  – 12,5 раза (для  $R_a = 1$  мм) и 13 раз (для  $R_a = 3$  мм); при осаждении покрытий на катод с  $R_k = 15$  мм в течение 3 проходов за 220 секунд рост  $\Delta m_a$  составляет 4,8 раза (для  $R_a = 1$  мм) и 5,4 раза (для  $R_a = 3$  мм), а  $\Delta m_k$  – 89 раз (для  $R_a = 1$  мм) и 90 раз (для  $R_a = 3$  мм). Также следует отметить, что увеличение радиуса

анода приводит к повышению привеса катода и уменьшению скорости эрозии анода, но эти изменения незначительны (менее 10 %).

Зависимости коэффициента массопереноса от продолжительности электроискрового легирования представлены на рис. 4. Они имеют спадающий вид с впадинами в конце первого и третьего проходов анода вдоль поверхности катода. С увеличением числа проходов высота ступенек снижается, зависимость  $K_M$  принимает вид, близкий к линейному. Коэффициент массопереноса растет с увеличением отношения  $\alpha$  и достигает 0,8-0,9, что говорит о малых потерях вещества в процессе его переноса между электродами при  $\alpha = 5$ . Рассматривая осаждение покрытий на один и тот же катод, установили, что коэффициент массопереноса будет выше, если радиус анода больше. Параметр  $K_M$  увеличивается также с ростом площади поверхности катода. При повышении площади катода с 79 до 708 мм<sup>2</sup> коэффициент массопереноса растет на 60 % для  $\alpha = 1,5$  и на 14 % для  $\alpha = 5$ .

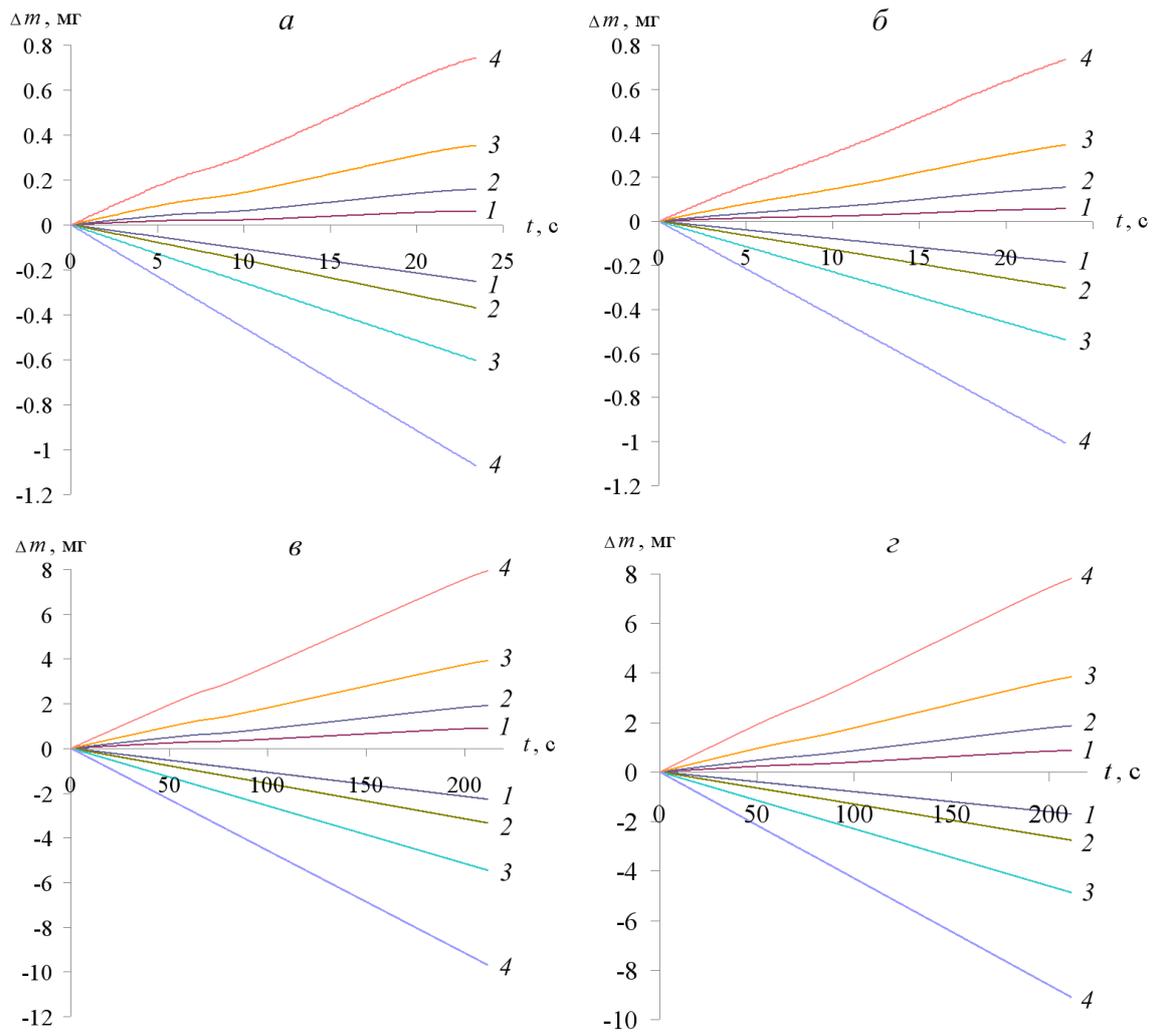


Рис. 3. Изменение масс катода (выше оси абсцисс) и анода (ниже оси абсцисс) за время, равное трем проходам анода вдоль поверхности катода. Отношение  $R_a/R_k$ : а - 1/5; б - 3/5; в - 1/15; г - 3/15. Отношение масс эродированного вещества анода и катода за один разряд: 1 -  $\alpha = 1,5$ ; 2 -  $\alpha = 2$ ; 3 -  $\alpha = 3$ ; 4 -  $\alpha = 5$

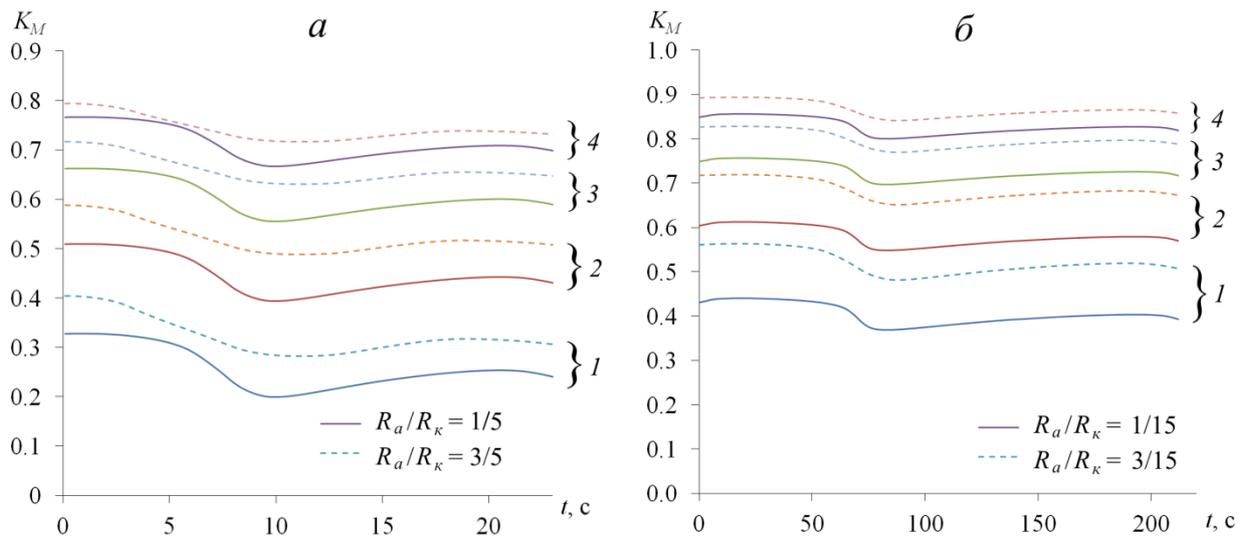


Рис. 4. Коэффициент массопереноса за три прохода анода вдоль поверхности катода. Отношение  $R_a/R_k$ : а - 1/5 (сплошная линия) и 3/5 (прерывистая линия); б - 1/15 (сплошная линия) и 3/15 (прерывистая линия). Отношение масс эродированного вещества анода и катода за один разряд: 1 -  $\alpha = 1,5$ ; 2 -  $\alpha = 2$ ; 3 -  $\alpha = 3$ ; 4 -  $\alpha = 5$

## Заключение

Результаты вычислений показали, что размеры электродов оказывают влияние как на кинетические зависимости изменения масс электродов, так и на коэффициент массопереноса металлов при электроискровом легировании. Чем больше площадь катода, тем больше вероятность осаждения на его поверхность эродированного во время разряда вещества анода. Это приводит к росту привеса катода и увеличению толщины наносимого слоя. Коэффициент массопереноса можно также повысить, если анод при движении не будет выходить за границы поверхности катода, на которую наносится покрытие. Тем не менее наибольшего эффекта в массопереносе вещества анода на катод мож-

но добиться, если эрозия материала анода во время единичного разрядного акта будет во много раз превышать эрозию материала катода. В этом случае коэффициент массопереноса может достигать значений, близких к 100 %. На практике это можно осуществить выбором энергетических параметров разрядных импульсов и предотвращением разрушения покрытия, осаждаемого на катод.

Полученные выражения могут быть полезны при создании автоматизированных установок для электрофизической обработки материалов и выборе оптимального режима нанесения электроискровых покрытий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верхотуров, А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А.Д. Верхотуров. - Владивосток: Дальнаука, 1995. - 282 с.
- Wang, B.-J. Spark erosion behavior of silver-based particulate composites / B.-J. Wang, N. Saka // *Wear*. - 1996. - V. 195. - P. 133-147.
- Ekmekci, B. White layer composition, heat treatment and crack formation in electric discharge machining process / B. Ekmekci // *Metal. Mater. Trans. B*. - 2009. - V. 40. - P. 70-81.
- Chen, Z. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings. Part I. Coating characterization / Z. Chen, Y. Zhou // *Surf. Coat. Technol.* - 2006. - V. 201. - P. 1503-1510.
- Намиток, К.К. Электроэрозионные явления / К.К. Намиток. - М.: Энергия, 1978. - 456 с.
- Galinov, I.V. Mass transfer trends during electro-spark alloying / I.V. Galinov, R.B. Luban // *Surf. Coat. Technol.* - 1996. - V. 79. - P. 9-18.
- Verkhoturov, A.D. *Metal Surface Layer Formation at Electrospark Alloying* / A.D. Verkhoturov. - Vladivostok: Dalnauka, 1995. - pp. 282.
- Wang, B.-J. Spark erosion behavior of silver-based particulate composites / B.-J. Wang, N. Saka // *Wear*. - 1996. - V. 195. - P. 133-147.
- Ekmekci, B. White layer composition, heat treatment and crack formation in electric discharge machining process / B. Ekmekci // *Metal. Mater. Trans. B*. - 2009. - V. 40. - P. 70-81.
- Chen, Z. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings. Part I. Coating characterization / Z. Chen, Y. Zhou // *Surf. Coat. Technol.* - 2006. - V. 201. - P. 1503-1510.
- Namitokov, K.K. *Electroerosion Phenomena* / K.K. Namitokov. - М.: Energy, 1978. - pp. 456.
- Galinov, I.V. Mass transfer trends during electro-spark alloying / I.V. Galinov, R.B. Luban // *Surf. Coat. Technol.* - 1996. - V. 79. - P. 9-18.
- Frangini, S. A study on the effect of a dy-k-l-h -h-k-Z-namic contact force control for improving electrospark coating properties / S. Frangini, A. Masci // *Surf. Coat. Technol.* - 2009. - V. 204. - Is. 16-17. - P. 2613-2623.
- Пячин, С.А. О зависимости изменения массы электродов от времени при электроискровом легировании / С.А. Пячин, Н.Е. Аблесимов, Д.Л. Ягодзинский // *Электронная обработка материалов*. - 2003. - № 1. - С. 19-26.
- Sharakhovskiy, L. Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process / L. Sharakhovskiy, A. Marotta, A.M. Essiptchouk // *Appl. Surf. Sci.* - 2006. - V. 253. - P. 797-804.
- Пячин, С.А. Влияние размеров и расположения электродов на перенос металлов при электроискровом легировании / С.А. Пячин // *Физика и химия обработки материалов*. - 2017. - № 1. - С. 17-28.

8. Pyachin, S.A. On dependence of electrode mass changes upon time of electrospark alloying / S.A. Pyachin, N.E. Ablesimov, D.L. Yagodzinsky // *Material Electronic Processing*. – 2003. – No.1. – pp. 19-26.
9. Sharakhovsky, L. Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process / L. Sha-

- rakhovsky, A. Marotta, A.M. Essiptchouk // *Appl. Surf. Sci.* - 2006. - V. 253. - P. 797-804.
10. Pyachin, S.A. Dimension and electrode location impact upon metal transfer at electrospark alloying / S.A. Pyachin // *Physics and Chemistry of Material Processing*. 2017. – No.1. – pp. 17-28.

*Ссылка для цитирования:*

*Пячин, С.А. Моделирование переноса металлов между электродами цилиндрической формы при электроискровом легировании / С.А. Пячин, О.И. Каминский, А.В. Беля, Б.Я. Мокрицкий // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 8. – С.49 - 55 .*

*Статья поступила в редакцию 11.07.19*

*Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института)*

*Владимирского государственного университета,*

*член редсовета журнала «Вестник БГТУ»*

*Соловьев Д.Л.*

*Статья принята к публикации 23. 07. 19.*

#### Сведения об авторах:

**Пячин Сергей Анатольевич**, д.физ.-мат.н., зам. директора по науч. работе Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, доцент кафедры физики Тихоокеанского государственного университета, e-mail: [pyachin@mail.ru](mailto:pyachin@mail.ru).

**Каминский Олег Игоревич**, мл. науч. сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, e-mail: [kamin\\_div0@mail.ru](mailto:kamin_div0@mail.ru).

**Pyachin Sergey Anatolievich**, Dr. Sc. Phys-Math., Deputy Director for Scientific Work, Institute of Material Science, HSC FER RAS, Assistant Prof. of the Dep. "Physics", Pacific Ocean State University, e-mail: [pyachin@mail.ru](mailto:pyachin@mail.ru).

**Kaminsky Oleg Igorevich**, Junior scientific assistant, Institute of Material Science, HSC FER RAS, e-mail: [kamin\\_div0@mail.ru](mailto:kamin_div0@mail.ru).

**Беля Александр Витальевич**, студент Тихоокеанского государственного университета, e-mail:

**Мокрицкий Борис Яковлевич**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, e-mail: [boris@knastu.ru](mailto:boris@knastu.ru).

**Belya Alexander Vitalievich**, Student, Pacific Ocean State University, e-mail: [whiewolf-97@mail.ru](mailto:whiewolf-97@mail.ru).

**Mokritsky Boris Yakovlevich**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Komsomolsk-upon Amur State University, e-mail: [boris@knastu.ru](mailto:boris@knastu.ru).