

Процесс массопереноса аморфных сплавов при низковольтной электроискровой обработке

*И. С. Кузнецов, А. В. Коломейченко, В. З. Павлов

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет»,
ул. Генерала Родина, 69, г. Орел, 302019, Россия, *e-mail: Ivan-654@yandex.ru

Проведены теоретические и экспериментальные исследования, раскрывающие физическую сущность процесса электроискровой обработки (ЭИО). Разработана математическая модель массопереноса электродного материала при низковольтной ЭИО. Она позволяет рассчитывать массу материала, переносимого с анода на катод, и управлять этим параметром посредством изменения начального напряжения, емкости конденсаторного блока, амплитуды и частоты вибрации электрода. Математическая модель подтверждена экспериментальными исследованиями эрозионных следов, оставленных электродами из аморфных сплавов на основе кобальта (84КХСР) и железа (2НСР), по результатам которых построены регрессионные степенные зависимости массы материала, перенесенной на катод, от начального напряжения. Расхождение расчетных и экспериментальных значений массы материала, осажденного на катоде, составило не более 5%.

Ключевые слова: электроискровая обработка, искровой разряд, анод, катод, масса электродного материала, напряжение, сопротивление, аморфный сплав, электрическая эрозия.

УДК 621.9.048:539.213

ВВЕДЕНИЕ

Среди способов, повышающих износостойкость рабочих поверхностей деталей машин, важное место занимают методы, позволяющие наносить упрочняющие покрытия с высокими физико-механическими свойствами. Одним из перспективных способов получения покрытий является ЭИО. В результате ЭИО на поверхности подложки образуется слой с измененной структурой и толщиной 10–500 мкм. К достоинствам этого способа относятся незначительный нагрев деталей, отсутствие тепловых деформаций, низкая энергоемкость и простота осуществления технологических операций, возможность упрочнения поверхностей сложной формы.

Впервые физическая модель процесса ЭИО была предложена отечественными учеными – основоположниками данного метода – Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Позднее развитие представлений о методе ЭИО привело к разработке А.Д. Верхотуровым новой модели, отличающейся учетом кинетики процесса и поверхностных явлений, проходящих на аноде и катоде. В настоящее время существует много научных работ, направленных на совершенствование представлений о физике процесса массопереноса при ЭИО. Например, в работах [1, 2] предложена качественная модель распространения энергии в материале при импульсном искровом воздействии, согласно которой одним из основных критериев оценки распространения тепловой энергии в материале является скорость распространения фононов. Эта модель может быть

использована для качественного анализа эрозии материала электродов. В работе [3] предложена математическая модель процесса низковольтного электроискрового легирования, которая позволяет контролировать изменение параметров и объяснять основные закономерности структурообразования наносимого материала. В работе [4] описана связь мощности искрового импульса, скорости движения электрода с толщиной наплавляемого слоя. Однако необходимо отметить, что данная работа имеет ряд существенных математических неточностей и не подтверждена экспериментально, поэтому можно утверждать, что и эта математическая модель не лишена недостатков. Более удачная и экспериментально подтвержденная модель для расчета толщины наносимого слоя представлена в работе [5], где профиль концентрационного распределения осажденного материала анода описывается функцией Лоренца. В работе [6] произведена теоретическая и экспериментальная оценка скорости охлаждения осаждаемого на катоде расплава, что позволит более точно прогнозировать физико-механические свойства электроискровых покрытий.

Все вышеописанные модели ЭИО имеют свои преимущества и недостатки, но главное, что затрудняет применение этих моделей для оценки и расчетов процесса массопереноса, – это то, что не учтены процессы фазовых переходов продуктов эрозии. Этот факт делает невозможным применение вышеописанных моделей для легкоплавких материалов, имеющих сложную кине-

тику фазовых переходов, таких как быстрозакаленные аморфные или нанокристаллические сплавы.

В свою очередь доказано, что использование быстрозакаленных аморфных и нанокристаллических сплавов в качестве электродных материалов при низковольтной ЭИО позволит существенно увеличить толщину и улучшить физико-механические свойства электроискровых покрытий [6–14], повысить износостойкость рабочих поверхностей деталей машин [15].

Цель работы – разработать математическую модель массопереноса электродного материала при низковольтной ЭИО, позволяющую рассчитывать массу материала, переносимого с анода на катод, и подтвердить ее экспериментально при ЭИО стальной подложки аморфными сплавами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Масса эродируемого с анода на катод материала определяется, прежде всего, величиной энергии, подводимой от генератора, частотой вибратора, временем обработки и теплофизическими характеристиками электродов. Для разработки модели массопереноса нами были проведены предварительные теоретические исследования. В работах [16] осуществлена попытка теоретического определения скоростей дрейфа заряженных частиц между электродами при ЭИО. Установлена расчетная зависимость диаметра искрового разряда от площади сечения электродов, напряжения и параметров газовой среды [17]. Получены формулы, позволяющие рассчитывать начальные боковые скорости заряженных частиц, среднюю концентрацию заряженных частиц в разряде и долю тепловой энергии, выделяемой на катоде [18].

На основе вышеописанных исследований и положения теории искры можем утверждать, что величина тока, проходящего в цепи при искровом разряде в момент контакта электродов, зависит от сопротивления цепи и подводимой энергии от генератора импульсов. Формула Ромпе и Вайцеля для сопротивления искры [19] в системе СИ имеет вид:

$$R = h_{cp} \cdot \left(\frac{2\alpha}{P_0} \int_0^{\tau} i^2 d\tau \right)^{-0.5}, \quad (1)$$

где R – сопротивление, Ом; h_{cp} – длина искрового промежутка, м; P_0 – давление среды, Па; i – ток, А; α – константа, характеризующая газ, $\alpha = 8-10 \text{ Па} \cdot \text{м}^2/\text{В}^2 \cdot \text{с}$.

Среднее значение длины искрового канала:

$$h_{cp} \approx 0,5h_{np} = 0,5 \frac{U_0}{E_{np}}, \quad (2)$$

где E_{np} – напряженность электрического поля при пробое, В/м; U_0 – начальное напряжение генератора, подаваемое на электроды, В; h_{np} – расстояние пробоя, м.

Вводя среднее значение тока за время сближения электродов, получим:

$$\int_0^{\tau} i^2 d\tau = i_{cp}^2 \cdot \tau_s, \quad (3)$$

где τ_s – время сближения электродов до контакта, с; i_{cp} – средний ток в искровом канале, А.

Средний ток в искровом канале, если пренебречь электронным током термоэмиссии катода:

$$i_{cp} = i_1 + i_2, \quad (4)$$

где i_1 – средний электронный ток ионизации, А; i_2 – средний ионный ток ионизации, А.

Учитывая расчеты, проведенные нами в работах [16–18], средний ток в искровом канале можно рассчитать по формуле:

$$i_{cp} = 0,33 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{U_0 P_0}{k T_0 E_{np}} \cdot (\bar{N}_e)_{кон}^{0,2} \cdot \frac{e}{\tau_p} + 0,25 \pi D^2 \cdot \frac{U_0 P_0}{k T_0 E_{np}} \cdot \left(\frac{D}{w_{io} \tau_p} \right)^{0,25} \cdot \frac{e}{\tau_p}, \quad (5)$$

где D – средний диаметр искрового канала; k – постоянная Больцмана, Дж/Кл; T_0 – температура среды, К; $(\bar{N}_e)_{кон}$ – принятая точность для конечной относительной (по отношению к начальной) концентрации электронов, $1/\text{м}^3$ [18]; e – заряд электрона, Кл; τ_p – длительность разряда, с; w_{io} – начальная боковая выносная скорость ионов в разряде, м/с [18].

Преобразовав формулу (5), суммарный ток в искровом канале можно рассчитать следующим образом:

$$i_{cp} = \pi D^2 \cdot \frac{U_0 P_0 e}{k T_0 P_0 \tau_p} \times \left[0,33 \cdot (\bar{N}_e)_{кон}^{0,2} + 0,25 \cdot \left(\frac{D}{w_{io} \tau_p} \right)^{0,25} \right]. \quad (6)$$

Пользуясь ранее проведенными расчетами [16–18], выражение в квадратных скобках формулы (6) при $D \approx 5 \cdot 10^{-6}$ м, $w_{io} \approx 1,15 \cdot 10^3$ м/с, $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-5}$ с, $(\bar{N}_e)_{кон} = 0,05 \text{ 1/м}^3$ равно 0,21. В итоге формула (6) примет следующий вид:

$$i_{cp} = 0,21 \pi D^2 \cdot \frac{U_0 P_0 e}{k T_0 E_{np} \tau_p}. \quad (7)$$

Подставив зависимости (2), (3) и (7) в формулу (1), найдем:

$$R = 2,38 \cdot \frac{k T_0 \tau_p}{\pi D^2 e} \cdot (2\alpha P_0 \tau_s)^{-0,5}. \quad (8)$$

С учетом величины диаметра канала разряда [17]:

$$D = 1,8 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\varepsilon_0 S}{\pi e H} \right)^{-0,5}. \quad (9)$$

Получим окончательную формулу для определения сопротивления:

$$R = 0,52 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{H k T_0 \tau_p}{S \varepsilon_0} \cdot (\alpha P_0 \tau_p)^{-0,5}, \quad (10)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, Кл²/Н·м²; S – поперечное сечение электрода (анода), м².

Коэффициент H , учитывающий затрату энергии поля на диссоциацию молекул воздуха, может быть принят $H = 0,90 \cdot 10^{27}$ В/м³ [17]. Сопротивление искры, рассчитанное по формуле (10), при значении длительности разряда $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-5}$ с [16], амплитуде 0,5–1,0 мм, характеристике сопротивления искры $RS = (3,2–4,6) \cdot 10^{-3}$ Ом·м² составит 640–920 Ом.

Изменение напряжения при разряде конденсатора:

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{\tau}{RC}\right), \quad (11)$$

где C – емкость конденсаторной батареи вибратора, Ф.

Расчет по формуле (11) при $\tau = \tau_s$ и $C = 56$ мкФ дает снижение напряжения $\bar{U} = U/U_0 \approx 0,98$, то есть разряд конденсатора происходит преимущественно при контакте электродов. Это позволяет нам сделать вывод, что при ЭИО импульсами тока малых энергий перенос материала с анода на катод происходит преимущественно при контакте электродов, что подтверждается оценочным расчетом по формулам, представленным в работе [20].

Для нахождения массы материала, переносимого с анода на катод, найдем длительность контакта τ_k , снижение напряжения при контакте ΔU_k и расход энергии ΔQ_k . Расход энергии конденсатора при разряде в контакте:

$$\Delta Q_k = \frac{C}{2} (U_0^2 - U_k^2), \quad (12)$$

где U_k – остаточное напряжение генератора после контакта, В.

С учетом формулы (11) получим:

$$\Delta Q_k = \frac{CU_0^2}{2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{2\tau_k}{CR_y}\right) \right], \quad (13)$$

где R_y – сопротивление цепи при контакте электродов, Ом.

Сопротивление цепи при контакте электродов:

$$R_y = R_{np} + R_A + R_{nl} + R_{cm}, \quad (14)$$

где R_{np} – сопротивление проводов контактной цепи, Ом; R_A – сопротивление электрода, Ом; R_{nl} – сопротивление зоны плавления, Ом; R_{cm} – сопротивление стягивания, Ом.

Снижение напряжения при контакте электродов:

$$\Delta U_k = U_0 - U_k = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{CR_y}\right) \right]. \quad (15)$$

Потеря энергии конденсаторов при контакте:

$$\Delta Q_k = \frac{\tau_k}{R_y} \cdot U_0^2 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{CR_y}\right) \right]^2. \quad (16)$$

Из условия равенства значений (13) и (16) найдем величину относительного времени контакта $\tau_k / (CR_y) = 1,043$. При этом снижение напряжения за время контакта по формуле (15) составит $\Delta U_k = 0,65 U_0$, а ток $i_k = 0,65 U_0 / R_y$. Общая потеря энергии в аноде:

$$\begin{aligned} \Delta Q_A &= i_k^2 R_y \tau_k = \\ &= \left(0,65 \cdot \frac{U_0}{R_y} \right)^2 R_A \cdot 1,043 \cdot CR_y = 0,44 U_0^2 C \frac{R_A}{R_y}. \end{aligned} \quad (17)$$

Во время низковольтной ЭИО при относительно невысоком нагреве анода энергия расходуется в основном на его нагрев, плавление и испарение материала в зоне контакта:

$$\Delta Q_A = \Delta Q_H + \Delta Q_{pl} + \Delta Q_{is}, \quad (18)$$

где ΔQ_H – расход энергии на нагрев анода, Дж; ΔQ_{pl} – расход энергии на плавление материала анода, Дж; ΔQ_{is} – расход энергии на испарение части расплавленного материала анода, Дж.

Ввиду сравнительно незначительного нагрева электрода в формуле (18) не учитывается расход энергии на нагрев окружающей среды.

Расход энергии на нагрев анода (за один контакт):

$$\Delta Q_H = C_A m_A (t_H - t_0) \cdot \frac{1}{f \tau_s}, \quad (19)$$

где C_A – удельная теплоемкость материала анода, Дж/(кг·°C); m_A – масса анода, кг; t_H – температура нагрева анода, °C; t_0 – начальная температура анода, °C; f – частота подачи импульсов, Гц; τ_s – длительность обработки, с.

Расход энергии на плавление электрода в зоне контакта:

$$\Delta Q_{pl} = m_{pl} [C_{pl} (t_{pl} - t_0) + L_{pl}], \quad (20)$$

где C_{pl} – удельная теплоемкость материала в процессе плавления, Дж/(кг·°C); m_{pl} – масса расплавленного материала, кг; t_{pl} – температура плавления, °C; L_{pl} – теплота плавления, Дж/кг.

Расход энергии на испарение материала электродов:

$$\Delta Q_{II} = m_{II} [C_{II}(t_{II} - t_0) + L_{II}], \quad (21)$$

где m_{II} – масса испарившегося материала, кг; C_{II} – удельная теплоемкость материала в процессе испарения, Дж/(кг·°C); t_{II} – температура испарения, °C; L_{II} – теплота испарения, Дж/кг.

С учетом формул (19) и (20) уравнение (18) примет вид:

$$\Delta Q_A - \Delta Q_H = m_{II} \left\{ C_{II}(t_{II} - t_0) + L_{II} + \frac{m_{II}}{m_{II}} [C_{II}(t_{II} - t_{II}) + L_{II}] \right\}. \quad (22)$$

Откуда масса материала M_T (кг), осаждаемая на катоде за время одного контакта:

$$M_T = (m_{II} - m_{II}) = m_{II} \cdot \left(1 - \frac{m_{II}}{m_{II}} \right) \cdot n, \quad (23)$$

$$M_T = \frac{(\Delta Q_A - \Delta Q_H) \cdot (1 - \beta)}{C_{II}(t_{II} - t_0) + L_{II} + \beta \cdot [C_{II}(t_{II} - t_{II}) + L_{II}]} \cdot n \cdot \nu, \quad (24)$$

где n – коэффициент, учитывающий массу расплавленного материала, оставшегося на аноде при размыкании электродов; ν – коэффициент, учитывающий массу материала, потерянного на разбрызгивание и испарение при взрыве металлического мостика.

Значения энергий ΔQ_A и ΔQ_H определяются формулами (18) и (19), а отношение между массами испарения и плавления обозначено коэффициентом $\beta = m_{II}/m_{II}$.

Массы плавления и испарения зависят от состава и теплофизических свойств материала электрода и изменяются в широких пределах. Однако можно ожидать, что отношение этих масс для конкретного электрода может обладать меньшей вариабельностью. В работе [20] приведены результаты изучения процессов получения паров металлов с помощью вакуумной дуги. Изучив данную работу, коэффициент β можно записать в виде:

$$\beta = 0,405 \cdot \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L_{II} + C_{II} \cdot (t_{II} - t_0)}{L_{II} + C_{II} \cdot (t_{II} - t_{II})} \right] \right\}. \quad (25)$$

После анализа работы [21] (не учитывая параметры разряда и свойства материалов электродов) для дальнейших расчетов примем $n = 0,7-0,75$. Опираясь на работу [22], в которой авторы утверждают, что в целом эрозия анода, обусловленная процессом мостикового переноса, не превышает 10% от полной эрозии, а также из-за отсутствия надежных экспериментальных данных по мостиковой эрозии исследуемых нами сплавов для расчета примем $\nu = 0,99$.

Общий привес материала, осажденного на катоде за время τ_n :

$$M_{II} = M_T \cdot f \cdot \tau_n \cdot \bar{K} \cdot K_{II}, \quad (26)$$

где \bar{K} – средний коэффициент переноса металла; K_{II} – коэффициент, определяющий вероятность прохождения искрового импульса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

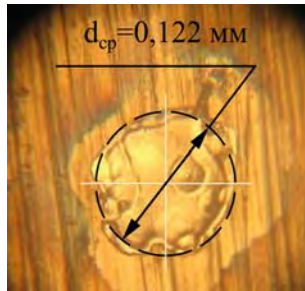
Экспериментальные исследования проводили на образцах, изготовленных из стали марки 65Г ГОСТ 14959. Поверхности образцов предварительно шлифовали до достижения $R_a \leq 0,32$ мкм (ГОСТ 2789, ГОСТ 27964). Для ЭИО использовали модернизированную установку марки UR-121, имеющую емкость $C = 56$ мкФ, частоту вибрации электрода $f = 100$ Гц. Электрические параметры установки представлены в таблице.

ЭИО осуществляли сборными электродами из аморфных сплавов марок 84КХСР (Co – 81,5%; Si – 7,3; Fe – 4,4; Cr – 4,1; В – 2,7%), 2НСР (Fe – 71,3%; Si – 7,2; В – 5,46; Ni – 2,2%). Массу переносимого с анода на катод электродного материала в зависимости от энергетических режимов определяли измерением геометрических параметров единичных эрозионных следов, оставленных электродом. Измерения единичных эрозионных следов, нанесенных электродами из сплавов вышеуказанных марок, на режимах, представленных в табл. 1, осуществляли микротвердомером ПМТ-3М. Микротвердомер оснащали окулярным винтовым микрометром МОВ-1-16^X, а также объективом ОЭ-25 (эпиобъектив – план – ахромат $F = 25,0$ мм, $A = 0,17$), общее увеличение микротвердомера составляло 130 крат.

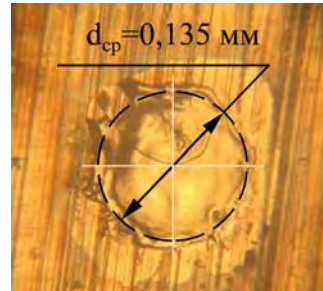
Для каждого из режимов работы установки было исследовано по 20 характерных следов. Измерения проводили по среднему диаметру валика эрозионного следа. После чего определяли среднеарифметический диаметр следа. Пример измерений представлен на рис. 1. Толщину эрозионных следов измеряли на поперечных шлифе в работе [8]. После чего определяли средний объем эрозионного кратера. Используя значения плотности электродных материалов и учитывая дефектность эрозионных следов, определенную в работе [23], вычисляли массу электродного материала, перенесенного с анода на катод за один контакт электрода с поверхностью. По результатам исследований выявляли зависимость массы эродируемого материала (за один контакт электрода) от начального напряжения.

Электрические параметры установки UR-121

| Параметр | Номер режима | | | | |
|------------------------------------|--------------|-------|------|-------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Ток I , А | 6,5 | 11 | 12,5 | 15,5 | 17,5 |
| Начальное напряжение U_0 , В | 30 | 45 | 53 | 65 | 73 |
| Энергия импульса тока $W_{и}$, Дж | 0,025 | 0,056 | 0,08 | 0,118 | 0,16 |

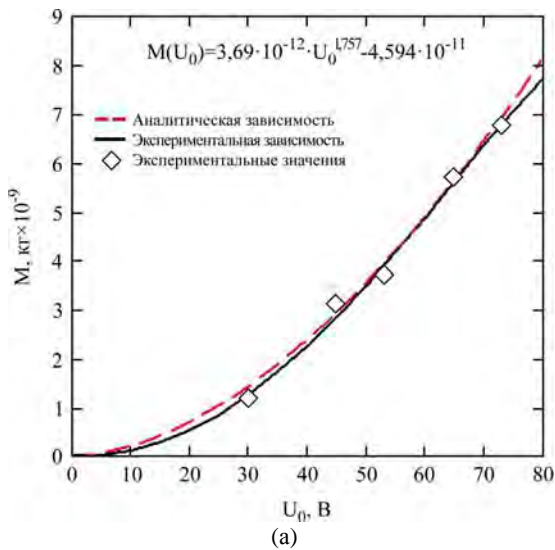


(a)

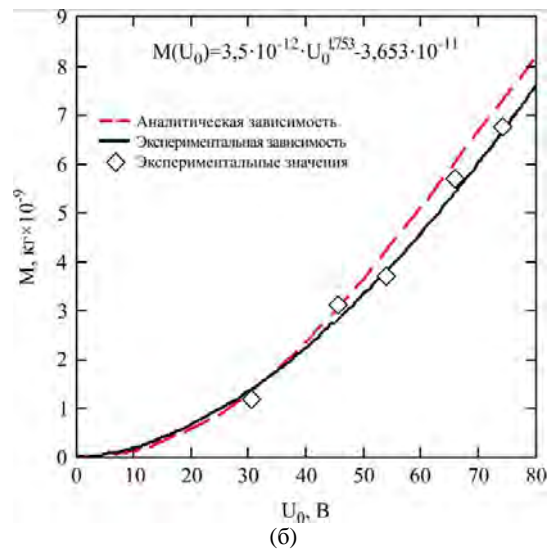


(б)

Рис. 1. Эрозионные следы, оставленные электродом из сплава марки 2HCP, при напряжении U_0 : (а) – 53 В; (б) – 73 В.



(a)



(б)

Рис. 2. Зависимость массы электродного материала, перенесенного с анода на катод, от начального напряжения при ЭИО электродами из сплавов марок: (а) – 84KXCP; (б) – 2HCP.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе экспериментальных исследований массопереноса нами были выявлены зависимости массы электродного материала, переносимого с анода на катод, от начального напряжения – одного из основных технологических параметров ЭИО. На рис. 2 представлены регрессионные степенные зависимости для двух исследуемых нами сплавов. Они построены по экспериментальным значениям массы, переносимой за один контакт электрода. Зависимости аппроксимированы регрессионной степенной функцией.

Для наглядности на этом же рисунке эмпирические зависимости совмещены с аналитическими, полученными по формуле (24) путем подстановки тепловых констант материалов электродов и экспериментальных значений нагрева.

Из рис. 2 видно, что независимо от материала электрода при увеличении начального напряже-

ния как аналитическая, так и экспериментальная масса переносимого материала нелинейно увеличивается. В диапазоне напряжений $U_0 = 0–80$ В расхождение аналитической и эмпирической зависимостей не более 5%.

Проанализировав рис. 2, следует отметить, что наибольшую массу, переносимую с анода на катод, имеет сплав с наименьшей эрозионной стойкостью химического элемента – основы сплава (по Л.С. Палатнику [24]). Это свидетельствует о том, что разработанная нами математическая модель массопереноса (формула 24) согласуется с электротермической теорией эрозии, которая характеризуется главным образом теплоемкостью, теплопроводностью, температурой и теплотой плавления применяемых электродных материалов. Факт согласования результатов теоретических и экспериментальных исследований с электротермической теорией эрозии также косвенно подтверждается результатами исследований эрозионных следов и сканирующей электронной микроскопией [23], из

которых следует, что на катоде осаждаются преимущественно продукты эрозии в жидкой фазе.

ВЫВОД

Разработана математическая модель массопереноса электродного материала для низковольтной ЭИО, позволяющая рассчитывать массу материала, переносимого с анода на катод, и управлять этим параметром посредством изменения начального напряжения, емкости конденсаторного блока, амплитуды, частоты вибрации и электродных материалов. Расхождение рассчитанных по формуле (24) и экспериментальных значений массы составило не более 5%.

ЛИТЕРАТУРА

- Gordienko P.S., Zhevtun I.G., Panin E.S., Shabalin I.A., et al. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **47**(3), 206–216.
- Верхотуров А.Д., Гордиенко П.С., Коневцов Л.А., Панин Е.С. *Вестник ДВО РАН.* 2010, (1), 46–54.
- Кондратьев А.И., Кочеткова И.В., Химухин С.Н. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2006, (8), 6–9.
- Логинов Н.Ю., Логинов Ю.Н., Худякова О.Ю. *Металлообработка.* 2004, (6), 13–14.
- Пячин С.А., Пугачевский М.А. *Физика и химия обработки материалов.* 2008, (3), 61–66.
- Gould BY J. *Weld J.* 2011, **90**(10), 191–197.
- Kolomeichenko A.V., Kuznetsov I.S., Kravchenko I.N. *Weld Int.* 2015, **29**(10), 823–825.
- Cadney S., Brochu M. *Intermetallics.* 2008, **16**(4), 518–523.
- Brochu M., Heard D.W., Milligan J., Cadney S. *Assembly automation.* 2010, **30**(3), 248–256.
- Milligan J., Heard D.W., Brochu M. *Appl Surf Sci.* 2010, **256**(12), 4009–4016.
- Cadney S., Goodall G., Kim G., Moran A., et al. *J Alloy Compd.* 2009, **476**(1–2), 147–151.
- Brochu M., Portillo G. *Materials Transactions.* 2013, **54**(60), 934–939.
- Tariq N.H., Hasan B.A., Shakil M., et al. *Vacuum.* 2014, **101**, 98–101.
- Heard D.W., Brochu M. *J Mater Process Tech.* 2010, **210**(6–7), 892–898.
- Kolomeichenko A.V., Kuznetsov I.S. *Friction and wear.* 2014, **35**(6), 501–504.
- Павлов В.З., Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. *Тракторы и сельхозмашины.* 2012, (6), 52–53.
- Павлов В.З., Кузнецов И.С., Коломейченко А.В. *Russian J of Agricultural and Socio-Economic Sciences.* 2012, **7**(7), 13–15.
- Коломейченко А.В., Павлов В.З., Кузнецов И.С. *Труды ГОСНИТИ.* 2013, **112**(2), 143–149.
- Василяк Л.М., Краснотуб А.В. *Успехи прикладной физики.* 2013, **1**(1), 43–48.
- Куляпин В.М. *Труды Института проблем материаловедения НАНУ. Серия «Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия».* Киев, 2010. С. 74–81.
- Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. *Металлообработка.* 2005, (3), 21–28.
- Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. *Электроискровое легирование металлических поверхностей.* Киев: Наукова думка, 1976. 220 с.
- Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. *Труды ГОСНИТИ.* 2014, **115**, 161–166.
- Палатник Л.С. *ДАН СССР.* 1953, **89**(3), 455–458.

Поступила 16.12.15

После доработки 14.04.16

Summary

The most important stage of the process of electro-spark deposition (ESD), which determines its efficiency, is a process deposition of mass of electrode material. In this paper both theoretical and experimental investigations revealing the physical essence of this process are conducted. A mathematical model of a process deposition of electrode material at a low-voltage ESD is developed. This model makes it is possible to calculate the mass of the material deposited from the anode to the cathode and to operate this parameter by changing the initial voltage, capacity of the condenser block, amplitude and frequency of vibration of the electrode. The proposed mathematical model is confirmed by experimental research of erosion traces left by electrodes of amorphous alloys based on cobalt (84KXCP) and iron (2HCP). Regression exponential dependencies of the mass of material, deposited on the cathode, on the initial voltage, are constructed. The discrepancy between the calculated and experimental values of the mass of the material deposited on the cathode make up no more than 5%.

Keywords: electrospark deposition, spark discharge, anode, cathode, mass of electrode material, voltage, resistance, amorphous alloy, electric erosion.