

Лойко А.М., Бойко А.Ф. Исследование многофакторных зависимостей размеров микроотверстий от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 20–26. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.03

Loyko A.M., Boyko A.F. Research of the multifactorial dependences of the dimensions of microholes on the basic parameters of the electrical discharge machining. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 20-26. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 2, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.03
УДК 621.9.048.4

А.М. Лойко, А.Ф. Бойко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РАЗМЕРОВ МИКРООТВЕРСТИЙ
ОТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ**

Представлены результаты исследований зависимостей диаметров микроотверстий от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки отверстий в твердом сплаве, в том числе глубоких микроотверстий с соотношением длины к диаметру более 15–20. На основе результатов проведенного на электроэрозионном станке модели 04ЭП-10МФ2 многофакторного эксперимента были получены математические модели четырехфакторных зависимостей диаметров на входе и выходе отверстий в виде степенных и линейных функций.

Для полученных математических моделей произведена статистическая оценка результатов планирования эксперимента по показателю адекватности модели. Проведена сравнительная оценка степени точности полученных моделей путем сравнения относительных погрешностей в каждой точке матрицы планирования эксперимента. Установлено, что точность полученных линейных функций выше, чем у степенных функций, как по показателю средней относительной погрешности, так и по показателю максимальной относительной погрешности.

Из полученных математических моделей и построенных в соответствии с ними графиков видно, что с увеличением диаметра электрода-инструмента, глубины обрабатываемого отверстия, а также электрических режимов обработки (энергии и частоты импульсов) при прочих неизменных параметрах процесса диаметр отверстия увеличивается. Наиболее значимым параметром, влияющим на размеры отверстий при электроэрозионной прошивке, помимо диаметра электрода-инструмента, является энергия электрических импульсов. Полученные математические модели позволяют подбирать оптимальный диаметр электрода-инструмента и назначать оптимальные электрические режимы обработки (энергию и частоту импульсов) в зависимости от требуемого диаметра обрабатываемого отверстия.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, прошивка микроотверстий, точность электроэрозионной прошивки, энергия импульсов электроэрозионной обработки, разбивка отверстия, конусность отверстия, микроотверстия, эксперимент, многофакторная зависимость, математическое моделирование.

A.M. Loyko, A.F. Boyko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

**RESEARCH OF THE MULTIFACTORIAL DEPENDENCES OF THE DIMENSIONS OF
MICROHOLES ON THE BASIC PARAMETERS OF THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING**

The article presents the results of investigations of the dependences of the diameter of micro-holes on the main parameters of the process of electrical discharge drilling in a hard alloy, including deep microholes with a length-to-diameter ratio of more than 15-20. Based on the results of the multifactorial experiment conducted on the electrical discharge machine model 04EP-10MF2, mathematical models of four-factor dependences of diameters at the inlet and outlet in the form of power and linear functions were obtained.

For the mathematical models received, a statistical evaluation of the results of the experiment on the indicator of model adequacy was made. A comparative evaluation of the degree of accuracy of the received models was made by comparing the relative errors at each point in the experimental planning matrix. It is established that the accuracy for linear functions is higher than for power functions, both in terms of the average relative error and the maximum relative error.

From the received mathematical models and graphs constructed in accordance with them, it is evident that with an increase in the diameter of an electrode-tool, the depth of a hole, and the electrical processing modes (energy and frequency of a pulses), with other constant parameters of the process, a hole diameter increases. The most significant parameter, influencing the hole sizes in electrical discharge drilling, besides the diameter of an electrode-tool, is the energy of electrical pulses. The received mathematical models allow selecting the optimal diameter of an electrode-tool and assigning optimal processing modes (pulse energy and pulse frequency) depending on the necessary diameter of the hole being treated.

Keywords: electrical discharge machining (EDM), EDM-drilling of microholes, EDM precision, EDM pulse energy overcut of holes, taper of holes, microholes, experiment, multifactorial dependence, math modeling.

Введение

В настоящее время в ряде отраслей промышленности (электронной, авиационной, медицинской, электротехнической и др.) существенно возросла потребность в высокопроизводительной электроэрозионной обработке микроотверстий диаметром до 0,2 мм в деталях из твердых сплавов, нержавеющей сталей и других материалов. Особое значение получение таких отверстий приобрело в производстве аграмматических хирургических игл, твердосплавного специнструмента, топливных распылителей, деталей пневморегулирующей авиационной и ракетной техники и других изделий [1–4].

Исследованиям процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий посвящено множество работ. Большинство из них позволили установить взаимосвязь между входными параметрами процесса (режимами обработки, геометрическими параметрами обрабатываемого отверстия) и выходными (производительностью, износом электрода-инструмента, качеством обрабатываемого отверстия) [1–14].

Данная статья является частью разрабатываемой методики определения оптимальных параметров процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий, направленной на повышение точности обработки. В данной работе представлены результаты исследований зависимостей изменения диаметров микроотверстий от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки, в том числе глубоких микроотверстий с соотношением длины к диаметру более 15–20.

В работе [1] достаточно подробно изложены виды погрешностей формы микроотверстий, полученных электроэрозионной прошивкой. Показано, что наиболее часто встречающейся погрешностью формы отверстий являются: в поперечном сечении – некруглость (овальность), в продольном осевом сечении – конусность.

Конусная разбивка отверстия, являющаяся следствием дополнительных разрядов в боковом зазоре через продукты эрозии, в определенной степени наблюдается во всех случаях электроэрозионной прошивки микроотверстий. Как показано в работе [6], диаметр отверстий на входе D всегда превышает диаметр отверстий на выходе d (рис. 1), причем для отверстий большой глубины разность между данными диаметрами может быть весьма существенна. Исходя из этого, в целях повышения точности обработки возникла необходимость в проведении многофакторного эксперимента по определению зависимостей диаметров микроотверстий от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки.

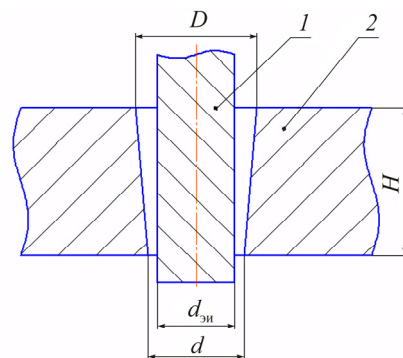


Рис. 1. Схема конусной разбивки отверстия:
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

Методика исследований

Эксперимент был выполнен на электроэрозионном станке модели 04ЭП-10МФ2 [15, 16]. В качестве электрода-инструмента использовалась вольфрамовая проволока диаметром от 50 до 100 мкм. В качестве обрабатываемого материала применялись пластины толщиной 1,3 и 1,85 мм, материал пластин – твердый сплав ВК6. В качестве рабочей жидкости при обработке применялась водопроводная вода. В данном эксперименте определяется зависимость диаметров отверстия на входе D и выходе d от диаметра электрода-инструмента $d_{эл}$, глубины отверстия H , энергии импульсов E и частоты следования импульсов f при следующих постоянных режимах обработки: частота вибрации электрода-инструмента $f_v = 380$ Гц, амплитуда вибрации электрода-инструмента $A = 10$ мкм.

Измерение диаметров отверстий производилось на цифровом микроскопе Levenhuk D70L, предварительно откалиброванном для определения размеров с помощью объекта-микрометра.

В основе многофакторного эксперимента лежит регрессивный (корреляционный) анализ, суть которого заключается в установлении уравнения регрессии, т.е. вида функциональной зависимости между случайными величинами: исследуемой функцией и переменными факторами.

Результаты исследований

Математическая модель диаметра отверстия D при электроэрозионной прошивке может быть представлена уравнением степенной функции в общем виде (1) и уравнением линейной функции в общем виде (2):

$$D = C \cdot d_{эл}^{\alpha_1} \cdot H^{\alpha_2} \cdot E^{\alpha_3} \cdot f^{\alpha_4}; \quad (1)$$

$$D = C + a_1 d_{эл} + a_2 H + a_3 E + a_4 f, \quad (2)$$

где $d_{эл}$ – диаметр электрода-инструмента, мкм; H – глубина отверстия, мм; E – энергия импульсов,

мкДж; f – частота следования импульсов, кГц; C , $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, a_1, a_2, a_3, a_4$ – параметры исследуемых моделей.

В работе подробно показан расчет параметров модели в виде степенной функции (1), как несколько более сложный по сравнению с расчетом линейной модели. Расчет параметров модели в виде линейной функции выполняется аналогично, согласно теоретическим рекомендациям [17, 18].

Для приведения уравнения (1) к линейному виду прологарифмируем его:

$$\ln D = \ln C + \alpha_1 \ln d_{\text{эл}} + \alpha_2 \ln H + \alpha_3 \ln E + \alpha_4 \ln f. \quad (3)$$

Примем $\ln D = y$, $\ln C = b_0$, $\alpha_1 = b_1$, $\ln d_{\text{эл}} = x_1$, $\alpha_2 = b_2$, $\ln H = x_2$, $\alpha_3 = b_3$, $\ln E = x_3$, $\alpha_4 = b_4$, $\ln f = x_4$, тогда уравнение (3) примет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4. \quad (4)$$

Решение этого уравнения сводится к нахождению коэффициентов b_0 – b_4 методом наименьших квадратов. В полученном линейном полиноме переменные факторы x_1 – x_4 принимают кодированные значения [17–20].

Кодирование переменных x_1 – x_4 осуществляется по следующим уравнениям преобразования:

$$x_1 = \frac{2(\ln d_{\text{эл}} - \ln d_{\text{эл max}})}{\ln d_{\text{эл max}} - \ln d_{\text{эл min}}} + 1; \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln H - \ln H_{\text{max}})}{\ln H_{\text{max}} - \ln H_{\text{min}}} + 1; \quad (6)$$

$$x_3 = \frac{2(\ln E - \ln E_{\text{max}})}{\ln E_{\text{max}} - \ln E_{\text{min}}} + 1; \quad (7)$$

$$x_4 = \frac{2(\ln f - \ln f_{\text{max}})}{\ln f_{\text{max}} - \ln f_{\text{min}}} + 1, \quad (8)$$

где $d_{\text{эл max}}$ и $d_{\text{эл min}}$ – соответственно максимальное и минимальное значения диаметра электрода-инст-

румента, мкм; H_{max} и H_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения глубины отверстия, мм; E_{max} и E_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения энергии импульса, мкДж; f_{max} и f_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения частоты импульсов, кГц.

Условия эксперимента представлены в табл. 1.

Натуральные значения факторов среднего уровня определяются по формуле (для диаметра электрода-инструмента $d_{\text{эл}}$)

$$d_{\text{эл ср}} = e^{\frac{\ln d_{\text{эл max}} + \ln d_{\text{эл min}}}{2}},$$

где $d_{\text{эл max}}$ и $d_{\text{эл min}}$ – соответственно максимальное и минимальное значения диаметра электрода-инструмента. Аналогично и для других параметров модели.

Кодированные значения факторов x_1 – x_4 по зависимостям (5)–(8) будут иметь вид

$$x_1 = 2,885 \ln d_{\text{эл}} - 12,287;$$

$$x_2 = 5,669 \ln H - 2,488;$$

$$x_3 = 1,724 \ln E - 6,87;$$

$$x_4 = 2,886 \ln f - 11,92.$$

Для определения коэффициентов уравнения (4) необходимо провести дробный факторный эксперимент с полурепликой типа 2^{4-1} . С целью снижения влияния дисперсии при проведении эксперимента в каждой точке плана проводится по 2 дублирующих опыта.

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

В соответствии с составленной матрицей планирования были проведены эксперименты и определены значения диаметров отверстий на входе D и выходе d (табл. 3).

Таблица 1

Таблица условий эксперимента

Уровень факторов	Натуральные значения факторов				Кодовые значения факторов			
	d , мкм	H , мм	E , мкДж	f , кГц	x_1	x_2	x_3	x_4
Верхний	100	1,85	96,15	88	+1	+1	+1	+1
Средний	70	1,55	53,83	62	0	0	0	0
Нижний	50	1,3	30,13	44	-1	-1	-1	-1

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Натуральные значения факторов				Кодовые значения факторов				
	d , мкм	H , мм	E , мкДж	f , кГц	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	100	1,85	96,15	88	+1	+1	+1	+1	+1
2	50	1,85	96,15	44	+1	-1	+1	+1	-1
3	100	1,3	96,15	44	+1	+1	-1	+1	-1
4	50	1,3	96,15	88	+1	-1	-1	+1	+1
5	100	1,85	30,13	44	+1	+1	+1	-1	-1
6	50	1,85	30,13	88	+1	-1	+1	-1	+1
7	100	1,3	30,13	88	+1	+1	-1	-1	+1
8	50	1,3	30,13	44	+1	-1	-1	-1	-1

Таблица 3

Результаты эксперимента

Номер опыта	Диаметр отверстия на входе D , мкм	$y_D = \ln D$	Диаметр отверстия на выходе d , мкм	$y_d = \ln d$
1	114,6	4,741	109,0	4,691
2	62,3	4,132	57,3	4,048
3	112,5	4,723	107,7	4,679
4	63,5	4,151	58,3	4,066
5	108,7	4,689	104,7	4,651
6	59,5	4,086	55,0	4,007
7	109,3	4,694	105,0	4,654
8	57,4	4,050	54,0	3,989

По результатам экспериментов определяются коэффициенты b_0 – b_3 уравнения (4) по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (9)$$

$$b_1 \dots b_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i, \quad (10)$$

где n – количество экспериментов; y_i – логарифм полученного значения эксперимента; x_i – кодовое значение фактора.

После вычисления коэффициентов по формулам (9) и (10) и подстановки их в уравнение (4) получим уравнение регрессии:

$$y_D = 4,408 + 0,304x_1 + 0,004x_2 + 0,029x_3 + 0,010x_4. \quad (11)$$

Аналогично было получено уравнение регрессии для диаметров на выходе отверстий:

$$y_d = 4,348 + 0,321x_1 + 0,001x_2 + 0,023x_3 + 0,006x_4. \quad (12)$$

После раскодирования уравнений (11) и (12) и потенцирования получим искомые математические модели:

$$D = 1,411d_3^{0,877} \cdot H^{0,023} \cdot E^{0,050} \cdot f^{0,029}; \quad (13)$$

$$d = 1,188d_3^{0,926} \cdot H^{0,006} \cdot E^{0,040} \cdot f^{0,017}. \quad (14)$$

Аналогично были получены математические модели диаметров в виде уравнений линейных функций:

$$D = 1,812 + 1,012d_3 + 1,080H + 0,068E + 0,034f; \quad (15)$$

$$d = 0,388 + 1,009d_3 + 0,455H + 0,051E + 0,020f. \quad (16)$$

Для полученных математических моделей была проведена сравнительная оценка степени точности путем сравнения относительных погрешностей δ в каждой точке матрицы планирования эксперимента:

$$\delta_i = \frac{|D_{pi} - D_{zi}|}{D_{zi}} \cdot 100 \%$$

где D_{pi} – расчетное значение диаметра в i -й точке плана, мкм; D_{zi} – экспериментальное значение диаметра в i -й точке плана, мкм;

Результаты расчетов точности моделей в виде степенных и линейных функций по показателям средней δ_{cp} и максимальной δ_{max} относительных погрешностей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительная оценка точности моделей

Математическая модель	$\delta_{cp}, \%$	$\delta_{max}, \%$
$D = 1,411d_3^{0,877} \cdot H^{0,023} \cdot E^{0,050} \cdot f^{0,029}$	0,82	1,40
$D = 1,812 + 1,012d_3 + 1,080H + 0,068E + 0,034f$	0,11	0,29
$d = 1,188d_3^{0,926} \cdot H^{0,006} \cdot E^{0,040} \cdot f^{0,017}$	0,65	1,04
$d = 0,388 + 1,009d_3 + 0,455H + 0,051E + 0,020f$	0,19	0,36

Из табл. 4 видно, что точность полученных линейных функций выше, чем у степенных функций, как по показателю средней относительной погрешности, так и по показателю максимальной относительной погрешности.

Для полученных моделей была произведена статистическая оценка результатов планирования эксперимента по показателю адекватности модели. Проверка адекватности модели выполнена по F -критерию Фишера [17, 18]. Для обеих моделей расчетное значение критерия оказалось меньше теоретического ($F_p < F_m$), следовательно, полученные математические модели адекватны.

На рис. 2–4 представлены графики зависимостей (13), (14), (15) и (16) диаметров отверстий при электроэрозионной прошивке микроотверстий от одного из факторов при среднем значении остальных факторов.

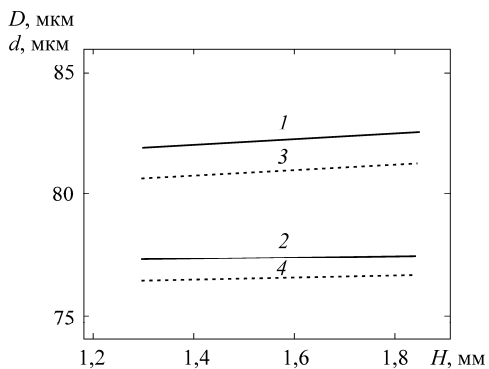


Рис. 2. График зависимостей диаметра на входе отверстия D и диаметра на выходе отверстия d от глубины отверстия H : степенных 1 – $D(H)$; 2 – $d(H)$ и линейных 3 – $D(H)$; 4 – $d(H)$ функций

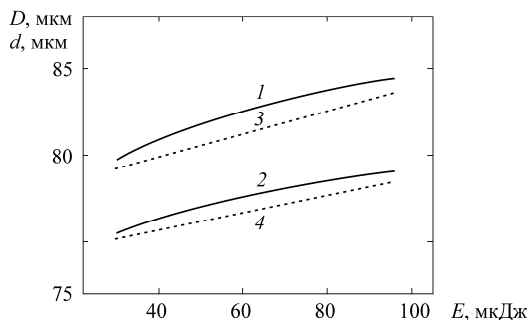


Рис. 3. График зависимостей диаметра на входе отверстия D и диаметра на выходе отверстия d от энергии импульса E : степенных 1 – $D(E)$; 2 – $d(E)$ и линейных 3 – $D(E)$; 4 – $d(E)$ функций

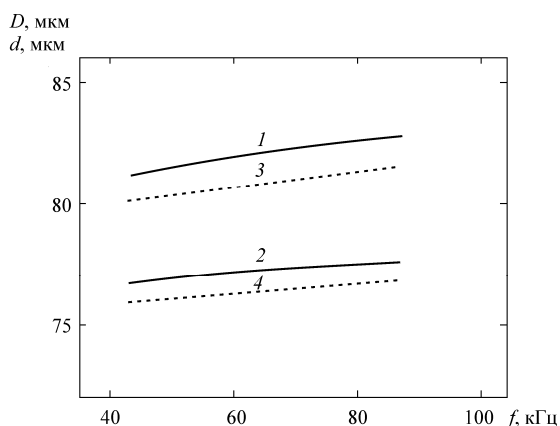


Рис. 4. График зависимостей диаметра на входе отверстия D и диаметра на выходе отверстия d от частоты импульсов f : степенных 1 – $D(f)$; 2 – $d(f)$ и линейных 3 – $D(f)$; 4 – $d(f)$ функций

Выводы

1. Из полученных математических моделей и построенных в соответствии с ними графиков видно, что с увеличением диаметра электрода-инструмента, глубины обрабатываемого отверстия, а также электрических режимов обработки (энергии и частоты импульсов) при прочих неизменных параметрах процесса диаметр отверстия увеличивается.

2. Наиболее значимым параметром, влияющим на размеры отверстий при электроэрозионной прошивке, помимо диаметра электрода-инструмента, является энергия импульсов. С увеличением значения энергии импульсов диаметр отверстия увеличивается, так как увеличивается величина бокового межэлектродного зазора вследствие возрастания значений напряжений в межэлектродном промежутке и увеличения размера твердых частиц, удаляемых из межэлектродного промежутка, что приводит к возникновению дополнительных рядов в боковом промежутке, увеличивающих диаметр отверстия.

3. Полученные математические модели позволяют подбирать оптимальный диаметр электрода-инструмента и назначать оптимальные электрические режимы обработки (энергию и частоту импульсов) в зависимости от требуемого диаметра обрабатываемого отверстия.

Список литературы

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. – Белгород: Изд-во Белгород. гос. техн. ун-та, 2010. – 314 с.

2. Домашенко Б.В. Разработка технологии и оборудования электроэрозионной прошивки капиллярных отверстий в атраumaticеских иглах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Белгород, 2007. – 20 с.

3. Jahan M.P., Rahman M., Wong Y.S. A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2011. – № 51. – С. 837–858.

4. Jahan M.P. Micro-electrical discharge machining // *Nontraditional Machining Processes*. – 2013. – С. 111–151.

5. Пузачева Е.И. Совершенствование технологии малоизносной электроэрозионной обработки высокоточных малых отверстий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Брянск, 2015. – 22 с.

6. Бойко А.Ф., Лойко А.М. Сравнительный анализ двух вариантов электроэрозионной прошивки малых отверстий // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 21, № 11. – С. 10–16.

7. Бойко А.Ф., Лойко А.М., Шестаков А.И. Особенности процесса естественной эвакуации продуктов обработки при электроэрозионной прошивке микроотверстий // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2016. – № 11. – С. 128–131.

8. Бойко А.Ф., Пузачева Е.И. Точность электроэрозионной прошивки микроотверстий // *Технология машиностроения*. – 2012. – № 6. – С. 50–53.

9. Исследование многофакторной зависимости износа электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке микроотверстий / А.Ф. Бойко, А.М. Лойко, С.С. Переверзев, И.Ю. Шинкарев // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2016. – № 7. – С. 116–121.

10. Исследование многофакторной зависимости производительности процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий / А.Ф. Бойко, А.М. Лойко, С.С. Переверзев, И.Ю. Шинкарев // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2016. – № 10. – С. 143–149.

11. Лойко А.М., Бойко А.Ф. Исследование зависимости износа электрода-инструмента и производительности процесса от материала электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке микроотверстий // *Актуальные проблемы развития науки и современного образования: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Белгород, 10 апреля 2017 г.)*. – Белгород, 2017. – С. 98–100.

12. Tiwary A.P., Pradhan B.B., Bhattacharyya B. Investigation on the effect of dielectrics during micro-electrodischarge machining of Ti-6Al-4V // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – № 95. – С. 861–874.

13. D'Urso G., Maccarini G., Ravasio C. Process performance of micro-EDM drilling of stainless steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – № 72. – С. 1287–1298.

14. Nguyen M.D., Rahman M., Wong Y.S. An experimental study on micro-EDM in low-resistivity deionized water using short voltage pulses // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – № 58. – С. 533–544.

15. Лойко А.М., Шинкарев И.Ю. Краткий обзор отечественного оборудования для электроэрозионной прошивки микроотверстий // *Научные технологии и инновации: материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых (Белгород, 1–20 мая 2016 г.)*. – Белгород, 2016. – С. 2363–2368.

16. Анализ погрешности перемещения координатного стола электроэрозионного станка 04ЭП-10М / А.Ф. Бойко, С.С. Переверзев, А.М. Лойко, И.Ю. Шинкарев // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2017. – № 6. – С. 124–127.

17. Погонин А.А., Бойко А.Ф., Блинова Т.А. Научно-исследовательская работа по специальности. – Белгород: Изд-во Белгород. гос. техн. ун-та, 2009. – 56 с.

18. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.

19. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов. – М.: Академия, 2005. – 288 с.

20. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

References

1. Boiko A.F. Effektivnaia tekhnologiia i oborudovanie dlia elektroerozionnoi proshivki precizionnyh mikrootverstii [Effective technology and equipment for an electroerosive insertion of precision microopenings]. *Izdatel'stvo Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, 314 p.

2. Domashenko B.V. Razrabotka tekhnologii i oborudovaniia elektroerozionnoi proshivki kapilliarnykh otverstii v atravmaticsесkikh iglah [Development of technology and equipment for EDM drilling of capillary holes in atraumatic needles]: PhD. thesis. Belgorod, 2007, 20 p.

3. Jahan M.P., Rahman M., Wong Y.S. A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2011, no. 51, pp. 837–858.

4. Jahan M.P. Micro-electrical discharge machining. *Nontraditional Machining Processes*. 2013, pp. 111–151.

5. Puzacheva E.I. Sovershenstvovanie tekhnologii maloiznosnoi elektroerozionnoi obrabotki vysokotochnykh malyykh otverstii [Improvement of technology of low-wear electric discharge machining of high-precision small holes]. PhD. thesis. Briansk, 2015, 22 p.

6. Boyko A.F., Loyko A.M. Comparative analysis of two variants of EDM drilling of small holes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017, vol. 21, no. 11, pp. 10–16.

7. Boyko A.F., Loyko A.M., Shestakov A.I. Features of process of natural evacuation of products of erosion in case of electrical discharge machining of microopenings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2016, no. 11, pp. 128–131. (In Russian)

8. Boiko A.F., Puzacheva E.I. Precision of electrical discharge machining of micro holes. *Tekhnologiya mashinostroeniia*. 2012, no. 6, pp. 50–53.

9. Boyko A.F., Loyko A.M., Pereverzev S.S., Shinkaryov I.Y. Research of multifactorial dependence of the tool-electrode wear at the electrical discharge machining of small openings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2016, no. 7, pp. 116–121.

10. Boyko A.F., Loyko A.M., Pereverzev S.S., Shinkaryov I.Y. Research of multifactorial dependence of productivity at the electrical discharge machining of small openings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2016, no. 10, pp. 143–149.

11. Loiko A.M., Boiko A.F. Issledovanie zavisimosti iznosa elektroda-instrumenta i proizvoditel'nosti protsessa ot materiala elektroda-instrumenta pri elektroerozionnoi proshivke mikrootverstii [Study of the dependence of electrode-tool wear and process productivity on the electrode-tool material under electrical discharge machining of micro holes]. *Aktual'nye problemy razvitiia nauki i sovremennogo obrazovaniia: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii* (Belgorod, 10 apreliia 2017 g.). Belgorod, 2017, pp. 98–100.

12. Tiwary A.P., Pradhan B.B., Bhattacharyya B. Investigation on the effect of dielectrics during micro-electrodischarge machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, no. 95, pp. 861–874.

13. D'Urso G., Maccarini G., Ravasio C. Process performance of micro-EDM drilling of stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, no. 72, pp. 1287–1298.

14. Nguyen M.D., Rahman M., Wong Y.S. An experimental study on micro-EDM in low-resistivity deionized water using short voltage pulses. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, no. 58, pp. 533–544.

15. Loiko A.M., Shinkarev I.Iu. Kratkii obzor otechestvennogo oborudovaniia dlia elektroerozionnoi proshiv-

ki mikrootverstii [Short overview of domestic equipment for electrical discharge machining of micro holes]. *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferencii molodykh uchenykh (Belgorod, 1–20 maia 2016 g.)*. Belgorod, 2016, pp. 2363–2368.

16. Boyko A.F., Pereverzev S.S., Loyko A.M., Shinkaryov I.Y. Analysis of an error of movement of a coordinate table of the electrical discharge machine 04EP-10M. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2017, no. 6, pp. 124–127.

17. Pogonin A.A., Boiko A.F., Blinova T.A. Nauchno-issledovatel'skaia rabota po spetsial'nosti [Research work on specialty]. Izdatel'stvo Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 56 p.

18. Gorskii V.G., Adler Iu.P. Planirovanie promyshlennykh eksperimentov [Planning of industrial experiments]. Moscow: Metallurgiiia, 1974, 264 p.

19. Rogov V.A. Metodika i praktika tekhnicheskikh eksperimentov [Methods and practice of technical experiments]. Moscow: Akademiia, 2005. 288 p.

20. Spiridonov A.A. Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment when studying technological processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 184 p.

Получено 19.03.2018

Об авторах

Лойко Алексей Михайлович (Белгород, Россия) – аспирант кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; e-mail: lam.bel@mail.ru.

Бойко Анатолий Федорович (Белгород, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова; e-mail: boyko_1947@bk.ru.

About the authors

Aleksey M. Loyko (Belgorod, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: lam.bel@mail.ru.

Anatoliy F. Boyko (Belgorod, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: boyko_1947@bk.ru.