

Переверзев С.С., аспирант,  
Шинкарев И.Ю., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗНОСА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКЕ МИКРООТВЕРСТИЙ

Lam.bel@mail.ru

В статье изложены результаты исследований зависимости износа электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке микроотверстий от шести основных параметров процесса. Были получены математические модели многофакторной зависимости износа электрода-инструмента и проведен графический анализ полученных зависимостей. Для полученных моделей была произведена статистическая оценка результатов планирования эксперимента по основным показателям: значимости коэффициентов и адекватности модели. Коэффициенты математических моделей были рассчитаны для электроэрозионной прошивки микроотверстий в различных материалах. Установлено, что износ электрода-инструмента в наибольшей степени зависит от диаметра электрода-инструмента.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, микроотверстия, износ электрода, многофакторная зависимость, математическое моделирование, эксперимент.

**Введение.** Для получения микроотверстий диаметром до 0,2 мм в условиях современного производства широкое применение нашёл метод электроэрозионной прошивки. В процессе обработки форма и размеры электрода-инструмента нарушаются из-за износа. При прошивке прецизионных микроотверстий износ электрода-инструмента во многом определяет точность обработки, а значит качество обрабатываемого изделия, его эксплуатационные характеристики [1–4]. Следовательно, снижение износа электрода-инструмента для прецизионной электроэрозионной прошивки микроотверстий является актуальной научной задачей. Для решения данной задачи необходимо провести глубокий анализ зависимости износа электрода-инструмента от параметров процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий.

Целью проведения эксперимента является определение реальной зависимости износа электрода-инструмента от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий.

**Методология.** Эксперимент был выполнен на электроэрозионном станке 04ЭП-10М с использованием оптической головки ОГМЭ-ПЗ. При проведении многофакторного эксперимента в качестве обрабатываемого материала использовалась хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т, в качестве электрода-инструмента – вольфрамовая проволока.

**Основная часть.** Электроэрозионная прошивка микроотверстий относится к методу прямого копирования, когда форма и размер получаемого отверстия определяются соответствующими

формой и размерами электрода-инструмента, имеющего в данном случае простейшую геометрическую форму в виде микропроволоки. В большинстве случаев исследуемый процесс применяется для получения сквозных и глухих микроотверстий диаметром 10 – 200 мкм.

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

В данном эксперименте определяется зависимость износа электрода-инструмента  $\gamma$  от диаметра электрода-инструмента  $d$ , глубины прошивки  $H$ , энергии импульса  $E$ , частоты следования импульсов  $f$ , частоты вибрации электрода-инструмента  $f_v$  и амплитуды  $A$ . В данном эксперименте проводится электроэрозионная прошивка микроотверстий диаметром от 20 мкм до 100 мкм.

Математическая модель износа электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке может быть представлена следующим уравнением в общем виде:

$$\gamma = C_1 \cdot d^{\alpha_1} \cdot H^{\alpha_2} \cdot E^{\alpha_3} \cdot f^{\alpha_4} \cdot f_v^{\alpha_5} \cdot A^{\alpha_6}, \quad (1)$$

где  $C_1, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  – параметры исследуемой модели.

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

$$\ln \gamma = \ln C_1 + \alpha_1 \ln d + \alpha_2 \ln H + \alpha_3 \ln E + \alpha_4 \ln f + \alpha_5 \ln f_v + \alpha_6 \ln A. \quad (2)$$

Примем

$$\ln \gamma = y, \ln C_1 = b_0, \alpha_1 = b_1, \ln d = x_1, \alpha_2 = b_2, \ln H = x_2, \alpha_3 = b_3, \ln E = x_3, \alpha_4 = b_4, \\ \ln f = x_4, \alpha_5 = b_5, \ln f_v = x_5, \alpha_6 = b_6, \ln A = x_6,$$

тогда уравнение (2) примет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6. \quad (3)$$

Решение этого уравнения сводится к нахождению коэффициентов  $b_0...b_6$  методом наименьших квадратов. В полученном линейном полиноме переменные факторы  $x_1...x_6$  принимают кодированные значения [5–7].

Кодирование переменных осуществляется по следующим уравнениям преобразования:

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln d + \ln d_{max})}{\ln d_{max} - \ln d_{min}} + 1, \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln H + \ln H_{max})}{\ln H_{max} - \ln H_{min}} + 1, \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot (\ln E + \ln E_{max})}{\ln E_{max} - \ln E_{min}} + 1, \quad (6)$$

$$x_4 = \frac{2 \cdot (\ln f + \ln f_{max})}{\ln f_{max} - \ln f_{min}} + 1, \quad (7)$$

$$x_5 = \frac{2 \cdot (\ln f_v + \ln f_{v max})}{\ln f_{v max} - \ln f_{v min}} + 1, \quad (8)$$

$$x_6 = \frac{2 \cdot (\ln A + \ln A_{max})}{\ln A_{max} - \ln A_{min}} + 1. \quad (9)$$

Так как варьирование факторов имеет большой диапазон, то невозможно одной моделью охватить весь интервал варьирования факторов. Следовательно, необходимо разбить интервалы варьирования для охвата всего диапазона.

Разобьем диапазон диаметров микроотверстий от 20 мкм до 100 мкм на два интервала варьирования от 20 мкм до 50 мкм и от 50 мкм до 100 мкм. Тогда модель износа электрода-инструмента будет иметь обозначения: для интервала варьирования от 20 мкм до 50 мкм –  $\gamma_{20-50}$ ; для интервала варьирования от 50 мкм до 100 мкм –  $\gamma_{50-100}$ .

Расчет модели для интервала варьирования от 50 мкм до 100 мкм приводится подробно, расчет для интервала варьирования от 20 мкм до 50 мкм выполняется аналогично.

Условия эксперимента для интервала варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм представлены в табл. 1.

Таблица 1

Таблица условий эксперимента для диаметров от 50 мкм до 100 мкм

Уровни факторов	Натуральные значения факторов						Кодовые значения факторов					
	$d$ , мкм	$H$ , мкм	$E$ , мкДж	$f$ , кГц	$f_v$ , Гц	$A$ , мкм	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
верхний	100	1200	50,47	100	590	16	+1	+1	+1	+1	+1	+1
средний	70	350	25,79	50	376,3	4	0	0	0	0	0	0
нижний	50	100	13,18	25	240	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Натуральные значения факторов среднего уровня определяются по формуле (для диаметра электрода-инструмента):

$$d_{cp} = e^{\frac{\ln d_{max} + \ln d_{min}}{2}}, \quad (10)$$

аналогично и для других параметров модели.

Кодированные значения факторов для модели с интервалом варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм по зависимостям (4) – (9) будут иметь вид:

$$x_1 = 2,89 \ln d - 12,29, \quad (11)$$

$$x_2 = 0,8 \ln H - 4,71, \quad (12)$$

$$x_3 = 1,49 \ln E - 4,84, \quad (13)$$

$$x_4 = 1,44 \ln f - 5,64, \quad (14)$$

$$x_5 = 2,22 \ln f_v - 13,19, \quad (15)$$

$$x_6 = 0,72 \ln A - 1. \quad (16)$$

Для определения коэффициентов уравнения (3) необходимо провести дробный факторный эксперимент с 1/8 репликой типа  $2^{6-3}$ .

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

В соответствии с составленной матрицей планирования были проведены эксперименты и определены величины линейного износа электрода-инструмента (табл. 3).

По результатам экспериментов определяются коэффициенты уравнения (3) по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_1^n y_i, \quad (17)$$

$$b_1 \dots b_6 = \frac{1}{n} \sum_1^n y_i x_i, \quad (18)$$

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

После вычисления коэффициентов по формулам (17) и (18) и подстановки их в уравнение (3) получим уравнение регрессии:

$$y_{\gamma(50-100)} = 4,07 - 0,52x_1 + 0,42x_2 + 0,1x_3 + 0,09x_4 + 0,18x_5 + 0,1x_6. \quad (19)$$

Таблица 2

## Матрица планирования эксперимента для диаметров от 50 мкм до 100 мкм

№ опыта	Натуральные значения факторов						Кодовые значения факторов						
	$d$ , мкм	$H$ , мкм	$E$ , мкДж	$f$ , кГц	$f_v$ , Гц	$A$ , мкм	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
1	100	1200	50,47	100	590	16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	50	1200	50,47	25	240	16	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	100	100	50,47	25	590	1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
4	50	100	50,47	100	240	1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
5	100	1200	13,18	100	240	1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
6	50	1200	13,18	25	590	1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
7	100	100	13,18	25	240	16	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
8	50	100	13,18	100	590	16	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1

Таблица 3

## Результаты экспериментов для диаметров от 50 мкм до 100 мкм

№ опыта	Износ электрода-инструмента $\gamma$ , %	$y = \ln \gamma$
1	70,8	4,26
2	166,7	5,12
3	30	3,4
4	50	3,9
5	47,5	3,86
6	122,5	4,72
7	15	2,71
8	100	4,61

По результатам экспериментов определяются коэффициенты уравнения (3) по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (17)$$

$$b_1 \dots b_6 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i, \quad (18)$$

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

После вычисления коэффициентов по формулам (17) и (18) и подстановки их в уравнение (3) получим уравнение регрессии:

$$y_{\gamma(50-100)} = 4,07 - 0,52x_1 + 0,42x_2 + 0,1x_3 + 0,09x_4 + 0,18x_5 + 0,1x_6. \quad (19)$$

После раскодирования уравнения (19) и потенцирования получим искомую математическую модель:

$$y_{50-100} = \frac{e^{5,02} \cdot H^{0,34} \cdot E^{0,15} \cdot f^{0,13} \cdot f_v^{0,4} \cdot A^{0,07}}{d^{1,5}}. \quad (20)$$

Аналогично была получена модель зависимости износа электрода-инструмента для интервала варьирования от 20 мкм до 50 мкм:

$$y_{20-50} = \frac{e^{7,43} \cdot H^{0,27} \cdot E^{0,15} \cdot f^{0,35} \cdot f_v^{0,4} \cdot A^{0,07}}{d^{1,68} \cdot f_v^{0,08}}. \quad (21)$$

Для полученных моделей была произведена статистическая оценка результатов планирования эксперимента по основным показателям: значимости коэффициентов и адекватности модели [5, 8].

При оценке значимости коэффициентов подлежат оценке коэффициенты уравнения регрессии (19) до его раскодирования. Значимость любого коэффициента уравнения проверяется путем сравнения абсолютного значения коэффициента  $b_i$  с доверительным интервалом  $\Delta b$  коэффициентов регрессии [5, 8]. Коэффициент  $b_i$  считается значимым, если:

$$|b_i| \geq \Delta b. \quad (22)$$

В результате расчетов было установлено, что все коэффициенты уравнения регрессии (19)

больше  $\Delta b$ , следовательно, они являются значимыми. Для интервала варьирования от 20 до 50 мкм было установлено, что коэффициент при переменной  $x_5$  меньше  $\Delta b$ , следовательно, он не является значимым.

Проверка адекватности модели выполнена по  $F$ -критерию Фишера [9]. Для обоих интервалов варьирования факторов расчетное значение критерия оказалось меньше теоретического ( $F_p < F_m$ ), следовательно, полученные математические модели адекватны.

Были проведены шестифакторные эксперименты с другими обрабатываемыми материалами, получены соответствующие математические модели. Установленные коэффициенты модели (1), полученные при электроэрозионной прошивке микроотверстий в различных материалах вольфрамовыми электродами-инструментами, представлены в табл. 4 и 5.

На рис. 1–3 представлены графики зависимости износа электрода-инструмента ( $y_{20-50}$  и  $y_{50-100}$ ) при электроэрозионной прошивке микро

отверстий моделей (20) и (21) от одного из факторов при среднем значении остальных факторов.

Таблица 4

**Коэффициенты модели относительного линейного износа  
электрода-инструмента диаметром 20 – 50 мкм:**

$$\gamma_{20-50} = C_1 \cdot d^{\alpha_1} \cdot H^{\alpha_2} \cdot E^{\alpha_3} \cdot f^{\alpha_4} \cdot f_v^{\alpha_5} \cdot A^{\alpha_6}$$

Обрабатываемый материал	$C_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
Латунь	208	-2,04	0,09	0,05	0,12	-0,06	0,023
Молибден	93,5	-0,87	0,21	0,12	0,27	-0,026	0,055
Сталь У8	40,3	-0,64	0,29	0,16	0,37	-0,019	0,074
Ковар 29НК	20,6	-0,66	0,28	0,5	0,36	-0,019	0,072
Медь	250,3	-1,24	0,15	0,08	0,19	-0,036	0,038
Твердый сплав ВК6М	83,3	-0,85	0,22	0,12	0,28	-0,025	0,056
Никель	79,4	-0,83	0,22	0,12	0,29	-0,024	0,057
Вольфрам	158	-1,06	0,17	0,096	0,22	-0,031	0,045
Сталь 12Х18Н10Т	16,86	-1,68	0,27	0,15	0,35	-0,02	0,07
Хром	37,3	-0,62	0,3	0,165	0,38	-0,018	0,077
Сплав 47НД	43,6	-0,65	0,28	0,156	0,36	-0,019	0,073
Тантал	35,5	-0,61	0,3	0,166	0,39	-0,018	0,077
Константан СМЦ 40 - 1,5	24,9	-0,53	0,34	0,19	0,45	-0,016	0,089

Таблица 5

**Коэффициенты модели относительного линейного износа  
электрода-инструмента диаметром 50 – 100 мкм:**

$$\gamma_{50-100} = C_1 \cdot d^{\alpha_1} \cdot H^{\alpha_2} \cdot E^{\alpha_3} \cdot f^{\alpha_4} \cdot f_v^{\alpha_5} \cdot A^{\alpha_6}$$

Обрабатываемый материал	$C_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
Латунь	310,5	-1,82	0,17	0,07	0,06	0,2	0,03
Молибден	1,42	-0,77	0,4	0,17	0,135	0,46	0,07
Сталь У8	15,9	-0,57	0,33	0,14	0,21	0,11	0,06
Ковар 29НК	10,8	-0,51	0,25	0,16	0,15	0,22	0,075
Медь	58,1	-1,11	0,18	0,09	0,08	0,2	0,04
Твердый сплав ВК6М	28	-0,76	0,22	0,1	0,09	0,28	0,05
Никель	10,3	-0,74	0,27	0,12	0,10	0,31	0,055
Вольфрам	34,3	-0,95	0,2	0,09	0,08	0,23	0,04
Сталь 12Х18Н10Т	151,4	-1,5	0,34	0,15	0,13	0,40	0,07
Хром	6,2	-0,55	0,36	0,18	0,14	0,26	0,08
Сплав 47НД	4,35	-0,58	0,35	0,16	0,12	0,35	0,07
Тантал	3,65	-0,54	0,38	0,17	0,145	0,33	0,08
Константан СМЦ 40 - 1,5	1,62	-0,47	0,41	0,19	0,16	0,44	0,085

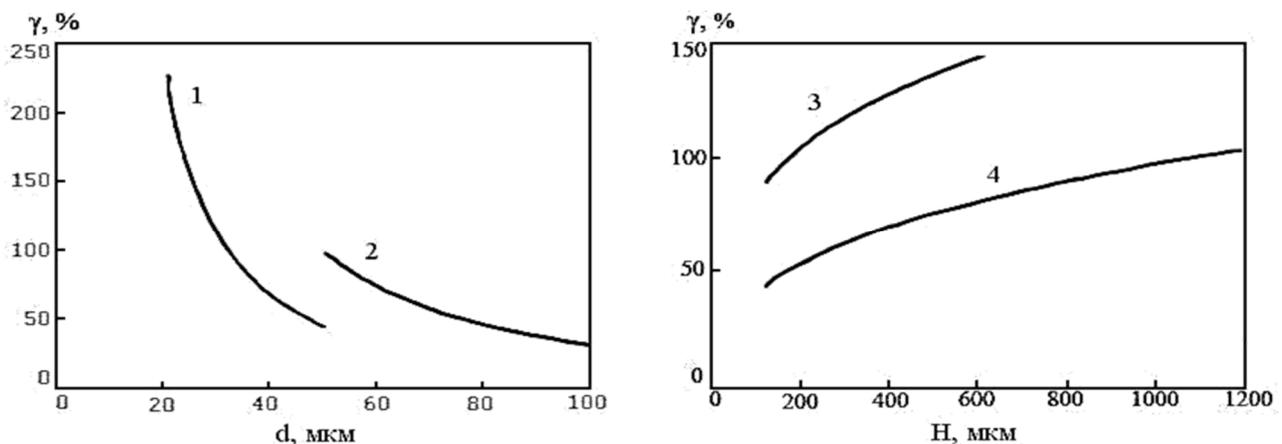


Рис. 1. Графики зависимости износа электрода-инструмента  $\gamma$  от диаметра  $d$  электрода-инструмента (слева) и глубины  $H$  прошиваемого отверстия (справа): 1 –  $\gamma_{20-50}(d)$ ; 2 –  $\gamma_{50-100}(d)$ ; 3 –  $\gamma_{20-50}(H)$ ; 4 –  $\gamma_{50-100}(H)$

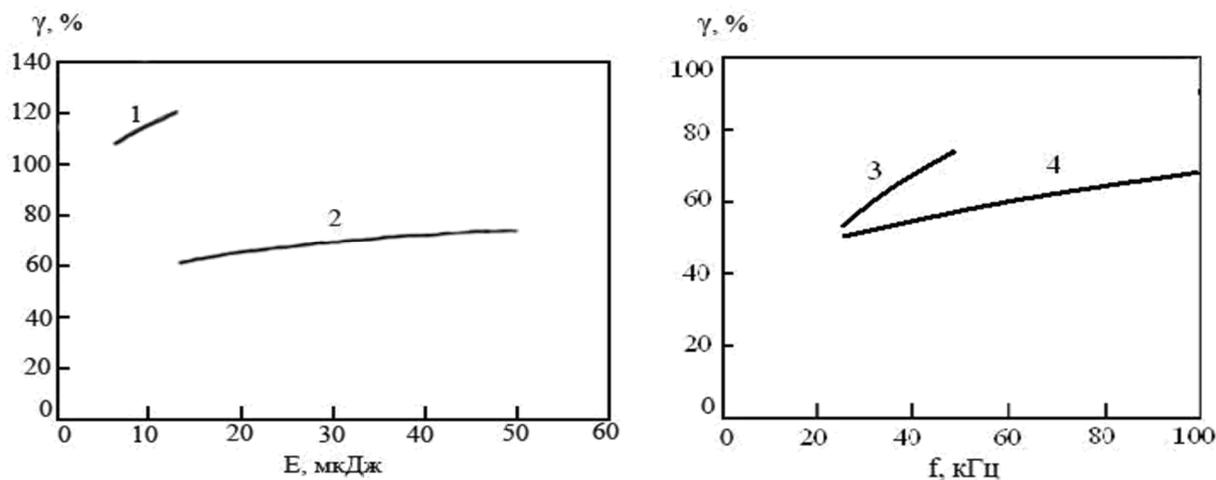


Рис. 2. Графики зависимости износа электрода-инструмента  $\gamma$  от энергии  $E$  импульсов (слева) и частоты  $f$  импульсов (справа): 1 –  $\gamma_{20-50}(E)$ ; 2 –  $\gamma_{50-100}(E)$ ; 3 –  $\gamma_{20-50}(f)$ ; 4 –  $\gamma_{50-100}(f)$

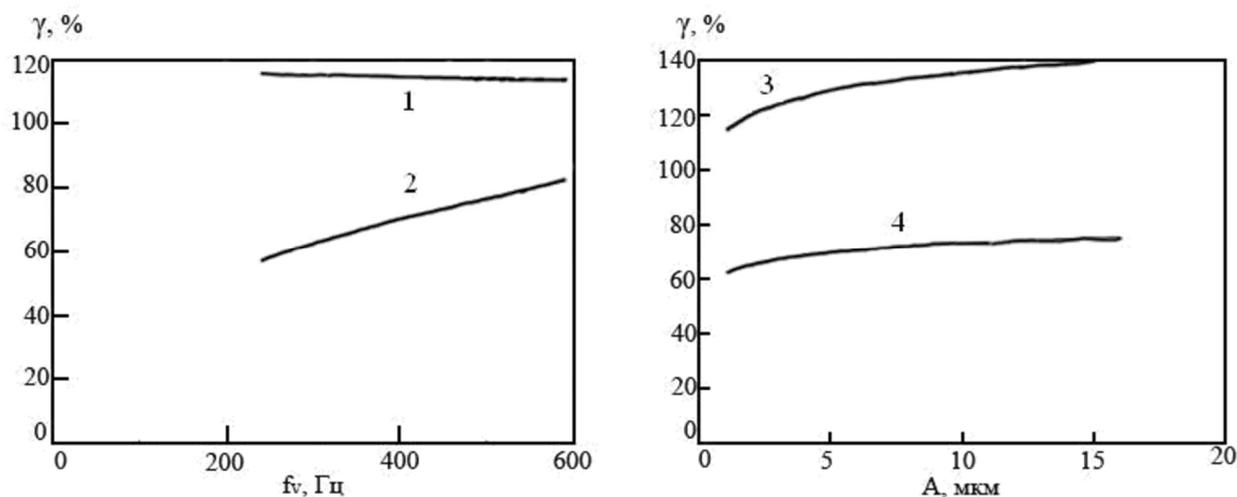


Рис. 3. Графики зависимости износа электрода-инструмента  $\gamma$  от частоты  $f_v$  вибрации и амплитуды  $A$  вибрации электрода-инструмента (справа): 1 –  $\gamma_{20-50}(f_v)$ ; 2 –  $\gamma_{50-100}(f_v)$ ; 3 –  $\gamma_{20-50}(A)$ ; 4 –  $\gamma_{50-100}(A)$

### Выводы:

1. Во всем исследуемом диапазоне диаметров электродов-инструментов с увеличением диаметра износ электрода-инструмента снижается (рис. 1, кривые 1 и 2), что объясняется уменьшением удельной электрической мощности, подводимой к межэлектродному промежутку (мощности на единицу обрабатываемой поверхности), и, соответственно, уменьшением термической нагрузки на электрод-инструмент.

2. С увеличением глубины обработки увеличивается износ электрода-инструмента (рис. 1, кривые 3 и 4), так как при обработке на большей глубине ухудшаются условия самозакачки продуктов эрозии из межэлектродного промежутка.

3. С увеличением энергии импульсов износ электрода-инструмента увеличивается во всем диапазоне энергий (рис. 2, кривые 1 и 2), что связано с увеличением удельной электрической мощности и термической нагрузки на электрод-инструмент в рабочей зоне.

4. Увеличение частоты импульсов существенно увеличивает износ электрода-

инструмента (рис. 2, кривая 3), но только в диапазоне малых диаметров, и несущественно – в диапазоне больших диаметров (кривая 4), что объясняется более высокой удельной подводимой электрической мощностью в случае прошивки отверстий малого диаметра.

5. Частота вибрации электрода-инструмента незначительно влияет на его износ в диапазоне малых диаметров электрода-инструмента (рис. 3, кривая 1) и значительно – в диапазоне больших диаметров (кривая 2); при этом с увеличением частоты вибрации значительно увеличивается износ электрода-инструмента, что объясняется относительным увеличением числа рабочих (полезных) разрядных импульсов в общем количестве генерируемых импульсов.

6. Из графиков на рис. 3 видно, что с увеличением амплитуды вибрации электрода-инструмента растет его износ (кривые 3 и 4). Таким образом, увеличение и частоты и амплитуды вибрации более эффективно для электродов-инструментов меньшего диаметра.

7. Из полученных математических моделей и построенных графиков видно, что наиболее

значимым параметром, влияющим на износ электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке, является диаметр электрода-инструмента.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
2. Пузачева Е.И. Совершенствование технологии малоизносной электроэрозионной обработки высокоточных малых отверстий: Автореф. дис. канд. техн. наук. Брянск, 2015. 22 с.
3. Бойко А.Ф., Пузачева Е.И. Точность электроэрозионной прошивки микроотверстий // Технология машиностроения. 2012. №6. С. 50–53.
4. Фатеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184

с.

5. Погонин А.А., Бойко А.Ф., Блинова Т.А. Научно-исследовательская работа по специальности. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 56 с.
6. Бойко А.Ф., Пузачева Е.И., Жуков Е.М. Исследование шероховатости обработанной поверхности при электроэрозионной прошивке малых отверстий с использованием малоизносной схемы генератора импульсов с индуктивностью в разрядной цепи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №3. С. 98–102.
7. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
8. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1974. 264 с.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

---

**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

*The article presents the results of research of dependence tool-electrode wear at electrical discharge machining (EDM) of small openings by six main process parameters. Mathematical models of multifactorial dependence of tool-electrode wear were obtained, and graphical analysis of the dependencies was performed. For the obtained models was performed statistical evaluation of experimental results in the main indicators: the significance of the coefficients and the adequacy of the model. The coefficients of mathematical models have been designed for EDM of small openings in various materials. It is found that the tool-electrode wear is most dependent on the diameter of the tool-electrode.*

**Key words:** *electrical discharge machining, small openings, electrode wear, multifactorial dependence, mathematical modeling, experiment.*

---

**Бойко Анатолий Федорович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Лойко Алексей Михайлович**, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: lam.bel@mail.ru

**Переверзев Станислав Сергеевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: perewerzev.ctanislav@yandex.ru

**Шинкарев Иван Юрьевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: egorka20082008@mail.ru