

DOI: 10.12737/22087

Бойко А.Ф., д-р техн. наук, доц.,
Лойко А.М., аспирант,
Переверзев С.С., аспирант,
Шинкарев И.Ю., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ МИКРООТВЕРСТИЙ

Lam.bel@mail.ru

В статье изложены результаты исследований зависимости производительности процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий от шести основных параметров процесса. Были получены математические модели многофакторной зависимости производительности обработки 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 производительность процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий в наибольшей степени зависит от энергии импульсов.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, микроотверстия, производительность, 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 связи с расширением номенклатуры изделий с микроотверстиями возникла необходимость повышения экономических показателей обработки, во многом определяемых производительностью процесса электроэрозионной прошивки [1–4]. Возникла актуальная научная задача повышения производительности электроэрозионной обработки микроотверстий. Для решения данной задачи необходимо провести глубокий анализ зависимости производительности обработки от параметров процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий.

Целью проведения эксперимента является определение реальной зависимости производительности процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий от основных параметров процесса.

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 производительности Q 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 производительности при электроэрозионной прошивке может быть представлена следующим уравнением в общем виде:

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

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:

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

Примем $\ln Q = y$, $\ln C_1 = b_0$, $\alpha_1 = b_1$, $\ln d = x_1$, $\alpha_2 = b_2$, $\ln H = x_2$, $\alpha_3 = b_3$, $\ln E = x_3$, $\alpha_4 = b_4$, $\ln f = x_4$, $\alpha_5 = b_5$, $\ln f_v = x_5$, $\alpha_6 = b_6$, $\ln A = x_6$, тогда уравнение (2) примет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 . \quad (3)$$

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, 6].

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 производительности будет иметь обозначения: для интервала варьирования от 20 мкм до 50 мкм – Q_{20-50} ; для интервала варьирования от 50 мкм до 100 мкм – Q_{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 значения производительности процесса прошивки (табл. 3).

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 – кодированное значение фактора.

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

$$y_{Q(50-100)} = 2,82 - 0,083x_1 - 0,62x_2 + 0,45x_3 + 0,11x_4 + 0,195x_5 + 0,075x_6 . \quad (19)$$

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 | Производительность обработки Q , мкм/с | $y = \ln Q$ |
|---------|--|-------------|
| 1 | 17,64 | 2,87 |
| 2 | 13,14 | 2,58 |
| 3 | 49,52 | 3,9 |
| 4 | 42,06 | 3,74 |
| 5 | 4,91 | 1,59 |
| 6 | 5,82 | 1,76 |
| 7 | 13,42 | 2,6 |
| 8 | 34,49 | 3,54 |

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

$$Q_{50-100} = \frac{e^{1,31 \cdot E^{0,67} \cdot f^{0,16} \cdot f_v^{0,43} \cdot A^{0,05}}}{d^{0,24} \cdot H^{0,5}} . \quad (20)$$

Аналогично была получена модель производительности обработки для интервала варьирования от 20 мкм до 50 мкм:

$$Q_{20-50} = \frac{d^{0,62} \cdot E^{1,4} \cdot f^{0,38} \cdot A^{0,05}}{e^{0,083} \cdot H^{0,66} \cdot f_v^{0,08}} . \quad (21)$$

Для полученных моделей была произведена статистическая оценка результатов планирования эксперимента по основным показателям: значимости коэффициентов и адекватности модели [5, 7].

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 Δb коэффициентов регрессии [5, 7]. 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 Δb , следовательно, они являются значимыми. Для интервала варьирования от 20 до 50 мкм было установлено, что коэффициент при переменной x_5 меньше Δb , следовательно, он не является значимым.

Проверка адекватности модели выполнена по F -критерию Фишера [8]. 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.

Таблица 4

Коэффициенты модели производительности процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий диаметром 20 – 50 мкм:

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

| Обрабатываемый материал | C_1 | α_1 | α_2 | α_3 | α_4 | α_5 | α_6 |
|--------------------------|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Латунь | 0,57 | 0,68 | -0,52 | 1,57 | 0,48 | -0,04 | 0,075 |
| Молибден | 3,86 | 0,63 | -0,70 | 1,33 | 0,39 | -0,07 | 0,06 |
| Сталь У8 | 3,96 | 0,47 | -0,81 | 1,46 | 0,47 | -0,04 | 0,05 |
| Ковар 29НК | 3,88 | 0,56 | -0,72 | 1,42 | 0,30 | -0,03 | 0,045 |
| Медь | 19,7 | 0,39 | -0,94 | 1,29 | 0,32 | -0,05 | 0,06 |
| Твердый сплав ВК6М | 10,5 | 0,41 | -0,86 | 1,18 | 0,43 | -0,06 | 0,055 |
| Никель | 3,46 | 0,53 | -0,71 | 1,26 | 0,35 | -0,075 | 0,04 |
| Вольфрам | 1,94 | 0,57 | -0,60 | 1,31 | 0,26 | -0,08 | 0,042 |
| Сталь 12Х18Н10Т | 0,92 | 0,62 | -0,66 | 1,40 | 0,38 | -0,08 | 0,05 |
| Хром | 3,5 | 0,52 | -0,69 | 1,25 | 0,20 | -0,085 | 0,035 |
| Сплав 47НД | 4,57 | 0,42 | -0,83 | 1,35 | 0,29 | -0,066 | 0,04 |
| Тантал | 13,04 | 0,35 | -0,90 | 1,28 | 0,21 | -0,09 | 0,03 |
| Константан СНМц 40 - 1,5 | 20,37 | 0,30 | -0,93 | 1,22 | 0,18 | -0,11 | 0,04 |

Таблица 5

Коэффициенты модели производительности процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий диаметром 50 – 100 мкм:

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

| Обрабатываемый материал | C_1 | α_1 | α_2 | α_3 | α_4 | α_5 | α_6 |
|--------------------------|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Латунь | 5,04 | -0,19 | -0,46 | 0,74 | 0,21 | 0,47 | 0,11 |
| Молибден | 3,47 | -0,2 | -0,42 | 0,77 | 0,19 | 0,45 | 0,09 |
| Сталь У8 | 4,32 | -0,26 | -0,38 | 0,61 | 0,23 | 0,41 | 0,085 |
| Ковар 29НК | 3,09 | -0,21 | -0,48 | 0,72 | 0,15 | 0,50 | 0,07 |
| Медь | 1,31 | -0,18 | -0,35 | 0,80 | 0,20 | 0,38 | 0,09 |
| Твердый сплав ВК6М | 6,54 | -0,22 | -0,47 | 0,70 | 0,14 | 0,35 | 0,06 |
| Никель | 3,41 | -0,15 | -0,52 | 0,64 | 0,26 | 0,40 | 0,06 |
| Вольфрам | 2,69 | -0,28 | -0,40 | 0,55 | 0,17 | 0,51 | 0,075 |
| Сталь 12Х18Н10Т | 3,71 | -0,24 | -0,5 | 0,67 | 0,16 | 0,43 | 0,05 |
| Хром | 12,5 | -0,29 | -0,56 | 0,65 | 0,12 | 0,32 | 0,04 |
| Сплав 47НД | 25,34 | -0,32 | -0,60 | 0,51 | 0,15 | 0,28 | 0,045 |
| Тантал | 14,58 | -0,30 | -0,63 | 0,61 | 0,15 | 0,31 | 0,035 |
| Константан СНМц 40 - 1,5 | 7,68 | -0,27 | -0,55 | 0,58 | 0,20 | 0,26 | 0,05 |

На рис. 1–3 представлены графики зависимости производительности процесса (Q_{20-50} и Q_{50-100}) электроэрозионной прошивки микроот-

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

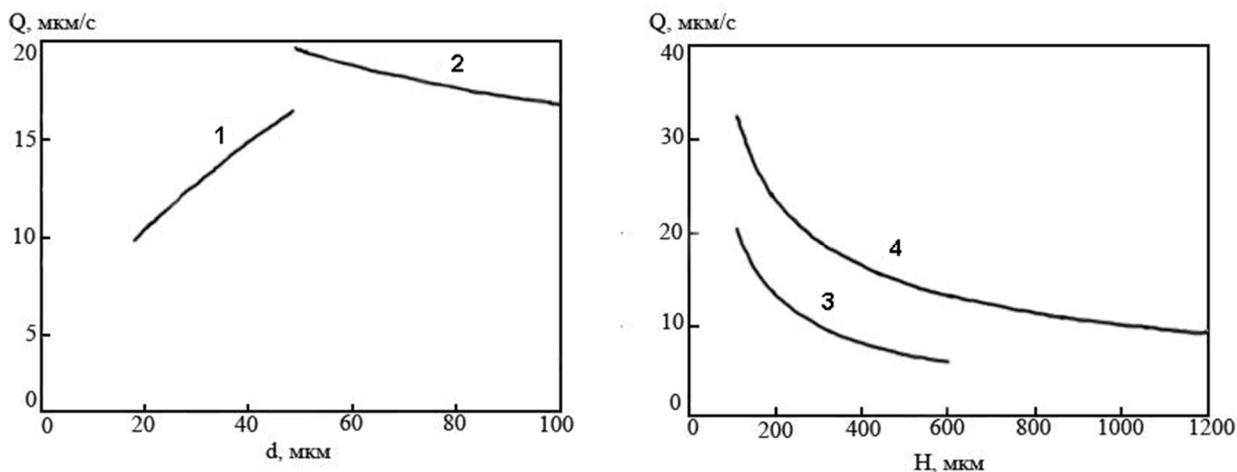


Рис. 1. Графики зависимости производительности Q от диаметра d электрода-инструмента (слева) и глубины H прошиваемого отверстия (справа): 1 – $Q_{20-50}(d)$; 2 – $Q_{50-100}(d)$; 3 – $Q_{20-50}(H)$; 4 – $Q_{50-100}(H)$

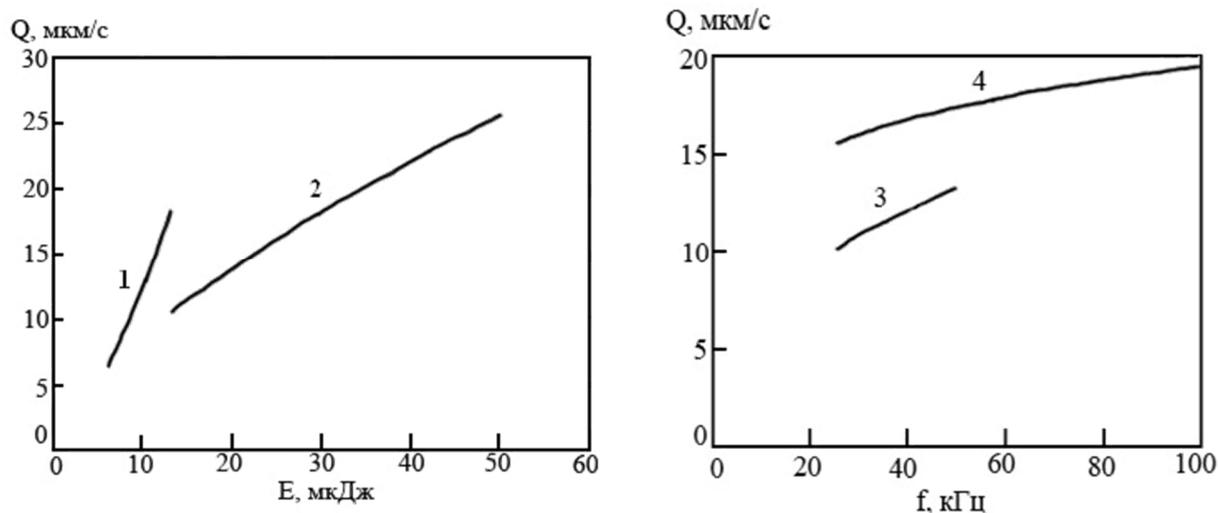


Рис. 2. Графики зависимости производительности Q от энергии E импульсов (слева) и частоты f импульсов (справа): 1 – $Q_{20-50}(E)$; 2 – $Q_{50-100}(E)$; 3 – $Q_{20-50}(f)$; 4 – $Q_{50-100}(f)$

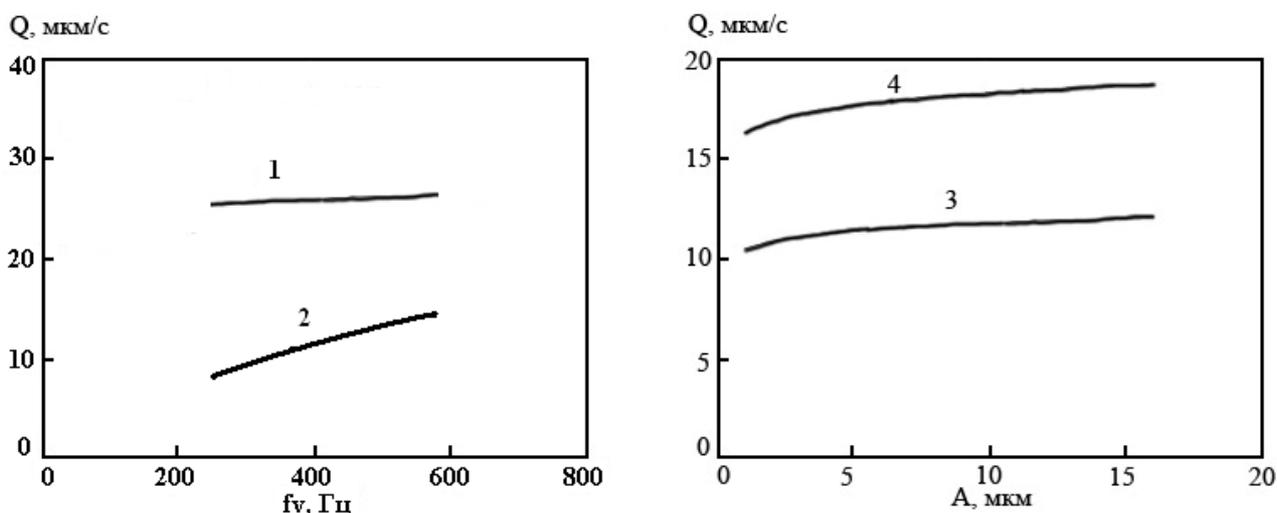


Рис. 3. Графики зависимости производительности Q от частоты f_v вибрации и амплитуды A вибрации электрода-инструмента (справа): 1 – $Q_{20-50}(f_v)$; 2 – $Q_{50-100}(f_v)$; 3 – $Q_{20-50}(A)$; 4 – $Q_{50-100}(A)$

Выводы:

1. С увеличением диаметра электрода-инструмента с 20 до 50 мкм при прочих неизменных условиях производительность процесса возрастает и, наоборот, с увеличением диаметра от 50 до 100 мкм при обработке на соответствующих режимах производительность падает (рис. 1, кривые 1 и 2). Этот факт подтверждает положение, что для каждого диаметра электрода-инструмента существует оптимальное сочетание режимов обработки, при котором обеспечивается наибольшая производительность [1].

2. С увеличением глубины обработки уменьшается производительность (рис. 1, кривые 3 и 4), так как при обработке на большей глубине ухудшаются условия самоэвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка.

3. С увеличением энергии импульсов производительность процесса увеличивается во всем диапазоне энергий (рис. 2, кривые 1 и 2), причем особенно интенсивно в области малых значений энергии.

4. Увеличение частоты импульсов увеличивает производительность процесса (рис. 2, кривые 3 и 4), причем более существенно в диапазоне малых диаметров, что объясняется более высокой удельной подводимой электрической мощностью в случае прошивки отверстий малого диаметра.

5. Частота вибрации электрода-инструмента незначительно влияет на производительность процесса в диапазоне малых диаметров электрода-инструмента (рис. 3, кривая 1) и значительно – в диапазоне больших диаметров (кривая 2); при этом с увеличением частоты вибрации увеличивается производительность процесса, 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 производительность процесса (кривые 3 и 4). При этом, больший эффект по производительности достигается в диапазоне больших диаметров электрода-инструмента. Таким образом, увеличение и частоты и амплитуды вибрации более эффективно для электродов-инструментов большего диаметра.

7. Из полученных математических моделей и построенных графиков видно, что наиболее значимым параметром, влияющим на производительность процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий, является энергия импульсов.

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

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

8. 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 PRODUCTIVITY AT THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF SMALL OPENINGS

The article presents the results of research dependence of productivity at electrical discharge machining (EDM) of small openings by six main process parameters. Mathematical models of multifactorial dependence of productivity 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 productivity is most dependent on the impulses energy.

Key words: electrical discharge machining, small openings, productivity, 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