

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.30987/article_5b86566b83cac8.63704747

А.М. Лойко, А.Ф. Бойко

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МНОГОФАКТОРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНУСНОСТИ МИКРООТВЕРСТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКОЙ

Представлены результаты исследований зависимости конусности микроотверстий от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки отверстий в твердом сплаве, в том числе глубоких микроотверстий с отношением длины к диаметру более 15–20. На основе результатов проведенного на электроэрозионном станке эксперимента получены математические модели четырехфакторных зависимостей конусности отверстий,

позволяющие подбирать оптимальный диаметр электрода-инструмента и назначать оптимальные электрические режимы обработки в зависимости от требуемого диаметра обрабатываемого отверстия.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, прошивка микроотверстий, электроэрозионная прошивка, энергия импульсов, конусность отверстия, разбивка отверстия, эксперимент.

А.М. Loiko, A.F. Boiko

MODEL DEVELOPMENT OF TAPER MULTI-FACTOR DEPENDENCE OF PINHOLES OBTAINED BY ELECTRO-EROSION BROACHING

The paper reports the results of investigations of the pinhole taper dependence upon basic parameters of hole electro-erosion broaching in a hard alloy including deep pinholes with the ratio of the length to the diameter more than 15-20. On the basis of the results of the multi-factor experiment carried out on an electro-erosion machine of 04EP-10MF2 model there were obtained simulators of four-factor dependences of a taper as power functions. For the simulators obtained there is carried out a statistic assessment of the results of experiment planning on indices of factors significance and model adequacy.

From the simulators obtained and diagrams formed in accordance with them it is evident that with

the increase of a tool electrode diameter, a depth of the hole under machining, and also electric modes of treatment (power and pulse frequency) other invariable parameters of the process hole taper increases. The most significant parameters affecting a hole taper at electro-erosion broaching are a hole depth and the power of electric pulses. The simulators obtained allow selecting an optimum diameter of a tool electrode and specifying optimum electric modes of treatment (power and pulse frequency) depending on a required diameter of the hole under processing.

Key words: electro-erosion treatment, pin-hole broaching, electro-erosion broaching, pulse energy, hole taper, hole break-up, experiment.

Введение

В последние годы в различных отраслях промышленности (авиационной, медицинской, электронной и др.) существенно возросла потребность в выполнении электроэрозионной прошивки микроотверстий диаметром до 0,2 мм в деталях из нержавеющей сталей, титановых сплавов, твердых сплавов и других материалов. В частности, большое значение получение микроотверстий электроэрозионным способом приобрело в производстве твердо-сплавного специнструмента, фильер, волоочильного инструмента, распылителей и других изделий [1; 2].

К настоящему времени выполнен значительный объем научных исследований процесса электроэрозионной прошив-

ки микроотверстий. Многие из опубликованных работ посвящены установлению взаимосвязей между входными параметрами процесса (геометрическими параметрами отверстия и режимами обработки) и выходными (износом электрода-инструмента, производительностью и качеством поверхности отверстия) [1–7].

Настоящая статья является частью разрабатываемой методики определения оптимальных параметров процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий, направленной на повышение точности и производительности обработки. В работе изложены результаты проведенных исследований зависимости конусности отверстий от основных параметров процесса

электроэрозионной обработки, в том числе глубоких микроотверстий с отношением длины к диаметру более 15–20.

В работе [1] достаточно подробно изложены виды погрешностей формы микроотверстий, полученных электроэрозионной прошивкой. Показано, что наиболее часто встречающимися погрешностями 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 наблюда-

ется во всех случаях электроэрозионной прошивки микроотверстий. Как показано в работе [4], 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. Поэтому в целях повышения точности обработки возникла необходимость в проведении многофакторного эксперимента по определению многофакторных зависимостей конусности отверстий от основных параметров процесса электроэрозионной прошивки.

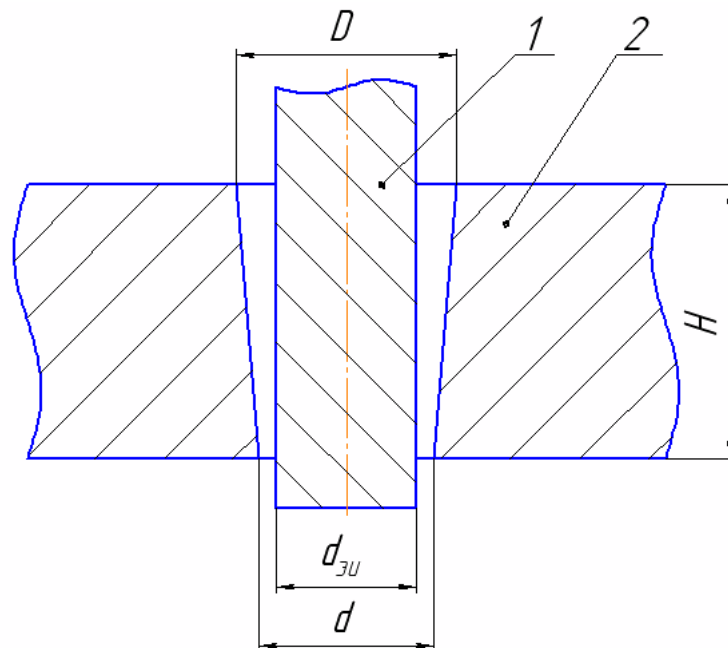


Рис. 1. Схема конусности отверстия: 1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования были выполнены на электроэрозионном прошивочном станке модели 04ЭП-10МФ2. В качестве электрода-инструмента использовалась вольфрамовая проволока диаметром от 50 до 200 мкм. В качестве обрабатываемого материала применялись пластины толщиной 1,3 и 1,85 мм из твердого сплава ВК6. В качестве рабочей жидкости при обработке применялась водопроводная вода. В данном эксперименте определяется зависимость конусности отверстия K от диаметра электрода-

инструмента d , 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 обработанных отверстий производилось на цифровом микроскопе Levenhuk D70L, предварительно откалиброванном для определения размеров с помощью объект-микрометра.

Результаты исследования

При разработке методики определения оптимальных параметров процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий было установлено, что для практического применения и удобства технологических расчетов целесообразно конусность отверстия оценивать не как стандартную конусность C по ГОСТ Р 53440-2009,

$$C = (D - d)/H, \quad (1)$$

а как разность диаметров отверстия на его входе (D) и выходе (d), так называемую условную конусность K :

$$K = D - d. \quad (2)$$

$$\ln K = \ln C + \alpha_1 \ln d + \alpha_2 \ln H + \alpha_3 \ln E + \alpha_4 \ln f. \quad (4)$$

Примем $\ln K = y$, $\ln C = b_0$, $\alpha_1 = b_1$, $\ln d = x_1$, $\alpha_2 = b_2$, $\ln H = x_2$, $\alpha_3 = b_3$, $\ln E = x_3$, $\alpha_4 = b_4$, $\ln f = x_4$. Тогда уравнение (4) примет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов $b_0 \dots b_4$ уравнения (5) используется метод наименьших квадратов (МНК). Переменные факторы $x_1 \dots x_4$ уравнения (5) принимают кодированные значения в соответствии со следующими уравнениями кодирования [8–10]:

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln d - \ln d_{\min})}{\ln d_{\max} - \ln d_{\min}} + 1, \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln H - \ln H_{\min})}{\ln H_{\max} - \ln H_{\min}} + 1, \quad (7)$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot (\ln E - \ln E_{\min})}{\ln E_{\max} - \ln E_{\min}} + 1, \quad (8)$$

$$x_4 = \frac{2 \cdot (\ln f - \ln f_{\min})}{\ln f_{\max} - \ln f_{\min}} + 1, \quad (9)$$

где d_{\max} и d_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения диаметра электрода-инструмента, 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 импуль-

сов, мкДж; f_{\max} и f_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения частоты импульсов, кГц.

В связи с большим диапазоном варьирования факторов разделим диапазон диаметров на два интервала варьирования: от 50 до 100 мкм и от 100 до 200 мкм. Модели конусности отверстий будут иметь следующие обозначения: для интервала варьирования от 50 до 100 мкм – K_{50-100} ; для интервала варьирования от 100 до 200 мкм – $K_{100-200}$.

$$K = C \cdot d^{\alpha_1} \cdot H^{\alpha_2} \cdot E^{\alpha_3} \cdot f^{\alpha_4}, \quad (3)$$

В данной работе приведен подробный расчет математической модели для интервала варьирования диаметров от 50 до 100 мкм. Расчет для интервала варьирования диаметров от 100 до 200 мкм выполняется аналогично.

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

Таблица 1

Условия эксперимента для диаметров от 50 до 100 мкм

Уровни 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

Кодированные значения факторов $x_1 \dots x_4$ для модели с интервалом варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм по зависимостям (6) – (9) будут иметь следующий вид:

$$x_1 = 2,885 \ln d - 12,287, \quad (10)$$

$$x_2 = 5,669 \ln H - 2,488, \quad (11)$$

$$x_3 = 1,724 \ln E - 6,87, \quad (12)$$

$$x_4 = 2,886 \ln f - 11,92. \quad (13)$$

Для определения коэффициентов уравнения (5) 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 два дублирующих опыта.

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для диаметров от 50 до 100 мкм

№ 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

В соответствии с составленной матрицей планирования были проведены эксперименты и определены значения конус-

ности отверстий при электроэрозионной прошивке (табл. 3).

Таблица 3

Результаты эксперимента для диаметров от 50 до 100 мкм

№ опыта	Диаметр отверстия на входе $D_{\text{отв}}$, мкм	Диаметр отверстия на выходе $d_{\text{отв}}$, мкм	Конусность отверстия K , мкм	$y = \ln K$
1	114,6	109,0	5,6	1,723
2	62,3	57,3	5,0	1,609
3	112,5	107,7	4,8	1,569
4	63,5	58,3	5,2	1,649
5	108,7	104,7	4,0	1,386
6	59,5	55,0	4,5	1,504
7	109,3	105,0	4,3	1,459
8	57,4	54,0	3,4	1,224

Коэффициенты уравнения (5) рассчитываются, исходя из полученных результатов эксперимента, по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (14)$$

$$b_1 \dots b_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i, \quad (15)$$

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

После нахождения коэффициентов $b_0 \dots b_4$ уравнения (5) было получено уравнение регрессии для интервала варьирования диаметров от 50 до 100 мкм:

$$y_{K(50-100)} = 1,515 + 0,019x_1 + 0,040x_2 + 0,122x_3 + 0,068x_4. \quad (16)$$

Аналогично было получено уравнение регрессии для интервала варьирования диаметров от 100 до 200 мкм:

$$y_{K(100-200)} = 1,652 + 0,013x_1 + 0,053x_2 + 0,198x_3 + 0,055x_4. \quad (17)$$

После раскодирования уравнений (16) и (17) и потенцирования получим искомые математические модели:

$$K_{50-100} = 0,627 \cdot d^{0,055} \cdot H^{0,227} \cdot E^{0,210} \cdot f^{0,196}, \quad (18)$$

$$K_{100-200} = 0,266 \cdot d^{0,038} \cdot H^{0,300} \cdot E^{0,332} \cdot f^{0,271}. \quad (19)$$

Для полученных математических моделей выполнена статистическая оценка результатов по показателям значимости коэффициентов и адекватности модели [8–10].

При оценке значимости коэффициентов подлежат оценке коэффициенты уравнений регрессии (18) и (19) до их раскодирования. По результатам расчетов определено, что все коэффициенты уравнений регрессии превышают доверительные интервалы коэффициентов регрессии, следовательно, они являются значимыми [8–10].

Адекватность математических моделей проверена путем сравнения разности расчетных и экспериментальных значений функции с ошибкой опыта σ_y . Разность расчетных и экспериментальных значений исследуемой функции не превышает ошибки опыта для обеих математических моделей.

Графики зависимостей (18) и (19) конусности отверстий (K_{50-100} и $K_{100-200}$) при электроэрозионной обработке от одного из факторов при среднем значении других факторов показаны на рис. 2–5.

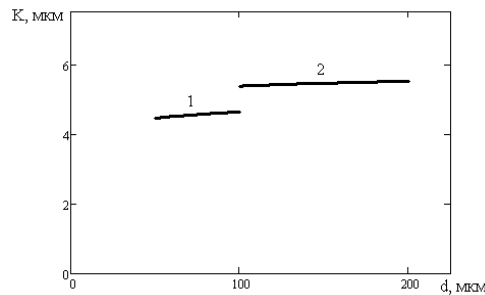


Рис. 2. График зависимости конусности отверстия K от диаметра электрода-инструмента d : 1 – $K_{50-100}(d)$; 2 – $K_{100-200}(d)$

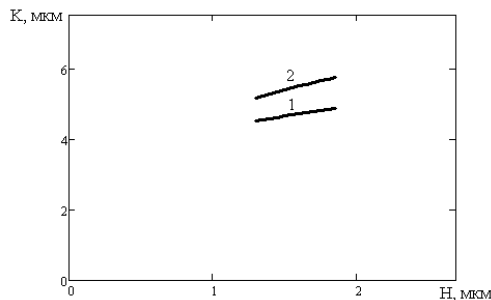


Рис. 3. График зависимости конусности отверстия K от глубины отверстия H : 1 – $K_{50-100}(H)$; 2 – $K_{100-200}(H)$

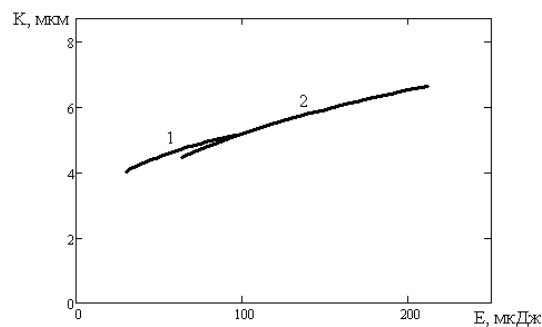


Рис. 4. График зависимости конусности отверстия K от энергии импульса E : 1 – $K_{50-100}(E)$; 2 – $K_{100-200}(E)$

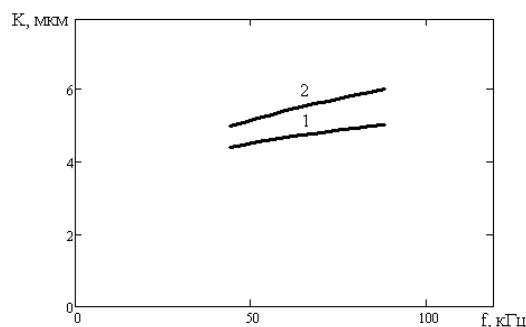


Рис. 5. График зависимости конусности отверстия K от частоты импульсов f :
 1 – $K_{50-100}(f)$; 2 – $K_{100-200}(f)$

Выводы

1. По результатам анализа математических моделей и построенных 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 конусность отверстия увеличивается.
2. Из всех рассматриваемых параметров наибольшее влияние на конусность отверстий при электроэрозионной прошивке оказывают глубина отверстия и энергия электрических импульсов.
3. С увеличением глубины обрабатываемого отверстия затрудняется эвакуация продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, что приводит к возникновению дополнительных разрядов в боковом промежутке, увеличивающих диаметр отверстия на входе и, следовательно, конусность отверстия.
4. С увеличением значения энергии импульсов конусность отверстия увеличивается, так как увеличивается величина бокового межэлектродного зазора вследствие возрастания значений напряжения в межэлектродном промежутке и увеличения размера твердых частиц, удаляемых из межэлектродного промежутка, что приводит к возникновению дополнительных разрядов в боковом промежутке, увеличивающих диаметр отверстия на входе.
5. 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 / А.Ф. Бойко. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. - 314 с.
2. Домашенко, Б.В. Разработка технологии и оборудования электроэрозионной прошивки капиллярных отверстий в атравматических иглах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Б.В. Домашенко. - Белгород, 2007. - 20 с.
3. Пузачева, Е.И. Совершенствование технологии малоизносной электроэрозионной обработки высокоточных малых отверстий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Е.И. Пузачева. - Брянск, 2015. - 22 с.
4. Блинова, Т.А. Разработка высокопроизводительной технологии электроэрозионной обработки малых отверстий в коллекторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Т.А. Блинова. - Белгород, 2010. - 19 с.
5. Бойко, А.Ф. 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.
6. D'Urso, G. The effects of electrode size and discharge power on micro-electro-discharge machining drilling of stainless steel / G. D'Urso, C. Ravasio // Advances in Mechanical Engineering. - 2016. - № 8. - P. 1-12.
7. Jahan, M.P. A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator / M.P. Jahan, Y.S. Wong, M. Rahman // Jour-

- nal of Materials Processing Technology. - 2009. - Т. 209. - № 4. - P. 1706-1716.
8. Погонин, А.А. Научно-исследовательская работа по специальности / А.А. Погонин, А.Ф. Бойко, Т.А. Блинова. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. - 56 с.
 1. Boiko, A.F. *Effective Technology and Equipment for Precision Pinhole Electro-Erosion Broaching* / A.F. Boiko. - Belgorod: Publishing House of BSTU, 2010. - pp. 314.
 2. Domashenko, B.V. Development of technology and equipment for electro-erosion broaching of capillary holes in atraumatic needles: *Author's Abstract for Can. Eng. Degree: 05.02.08* / BV. Domashenko. - Belgorod, 2007. - pp. 20.
 3. Puzachey, E.I. Improvement of technology for low-wear electro-erosion treatment of precise small holes: *Author's Abstract for Can. Eng. Degree: 05.02.07.* / E.I. Puzacheva. - Bryansk, 2015. - pp. 22.
 4. Blinova, T.A. Development High-performance technology of electro-erosion treatment of small holes in collectors: *Author's Abstract of the Thesis for Can. Eng. Degree: 05.02.08* / T.A. Blinova. - Belgorod, 2010. - pp. 19.
 5. Boiko, A.F. Investigation of multi-factor dependence of pinhole electro-erosion broaching productivity / A.F. Boiko, A.M. Loiko, S.S. Pereverzev, I.Yu. Shinkaryov // *Bulletin of Shukhov State Technological University of Belgorod*. - 2016. - No.10. - pp. 143-149.
 6. D'Urso, G. The effects of electrode size and discharge power on micro-electro-discharge machining drilling of stainless steel / G. D'Urso, C. Ravasio // *Advances in Mechanical Engineering*. - 2016. - № 8. - P. 1-12.
 7. Jahan, M.P. A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator / M.P. Jahan, Y.S. Wong, M. Rahman // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2009. - Т. 209. - № 4. - P. 1706-1716.
 8. Pogonin, A.A. *Scientific-Research Work on Specialty* / A.A. Pogonin, A.F. Boiko, T.A. Blinova. - Belgorod: Publishing House of BSTU, 2009. - pp. 56.
 9. Rogov, V.A. *Procedure and Practice of Technical Experiments* / V.A. Rogov. - M.: Academy, 2005. - pp. 288.
 10. Gorsky, V.G. *Planning of Industrial Experiments* / V.G. Gorsky, Yu.P. Adler. - M.: Metallurgy, 1974. - pp. 264.

Статья поступила в редколлегию 4.04.18.
Рецензент: д.т.н., профессор НИУ «БелГУ»
Пелипенко Н.А.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Loiko Alexey Mikhailovich, Post graduate student of the Dep. "Engineering Techniques", Shukhov State Technological University of Belgorod, e-mail: lam.bel@mail.ru.

Бойко Анатолий Фёдорович, д.т.н., доцент, профессор кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, e-mail: boyko_1947@bk.ru.

Boiko Anatoly Fyodorovich, D. Eng., Assistant Prof., of the Dep. "Engineering Techniques", Shukhov State Technological University of Belgorod, e-mail: boyko_1947@bk.ru.