

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.05

УДК 621.9

**Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, Д.А. Борисов,
А.А. Шумков, И.Ю. Летягин**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 38Х2Н2МА

Целью работы является получение эмпирической модели для расчета величины межэлектродного зазора при копировально-прошивной электроэрозионной обработке стали 38Х2Н2МА. В связи с тем, что копировально-прошивная электроэрозионная обработка является бесконтактным методом, при внедрении электрода-инструмента в обрабатываемую заготовку между торцевыми и боковыми поверхностями электрода-инструмента и формируемой полости образуются соответственно торцевой и боковой зазоры. Основными факторами, влияющими на величину зазоров, являются режимы обработки и материал электродов. Исходя из этого актуальной задачей становится прогнозирование величины межэлектродного зазора при обработке хромосодержащих сталей в зависимости от режимов копировально-прошивной электроэрозионной обработки. Для получения эмпирической модели в работе использована методика факторного планирования эксперимента с последующим регрессионным анализом. Критерием оптимальности плана в ортогональном центральном композиционном планировании является ортогональность столбцов матрицы планирования. Для проведения эксперимента выбраны следующие факторы: I – сила тока, А; $T_{оп}$ – время действия импульса, мкс; $T_{ав}$ – коэффициент заполнения импульсами, %. Согласно проведенному эксперименту и последующему регрессионному анализу получена модель для расчета величины бокового зазора. На основе полученных данных становится возможным прогнозирование величины коррекции при обработке стали 38Х2Н2МА. Анализ модели показал, что на величину зазора влияют не только сами факторы, но и их совокупность. Представлено геометрическое изображение закона изменения величины бокового зазора в зависимости от режимов электроэрозионной обработки. Полученные данные позволяют производить корректировку размеров электрода-инструмента с целью обеспечения заданных показателей точности обработки.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, точность, качество, факторный эксперимент, регрессионный анализ, эмпирическая модель, зависимость, напряжение, импульс, режимы обработки.

**T.R. Ablyaz, E.S. Schlykov, D.A. Borisov,
A.A. Shumkov, I.Yu. Letyagin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

SPARK GAP EMPIRICAL SIMULATION DURING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF STEEL 38X2H2MA

The aim of the work is to obtain an empirical model for calculating the value of the spark gap in the electrical discharge machining of 38X2H2MA steel. Due to the fact that the discharge machining is a non-contact method, when the tool electrode is inserted into the workpiece between the end faces and the side surfaces of the tool electrode and the cavity formed, respectively, the end and side clearances are formed. The main factors affecting the size of the gaps are processing modes and material of the electrodes. The actual task is to predict the size of the spark gap when processing chromium-containing steels, depending on the modes of copy-piercing erosion processing. To obtain the empirical model, the method of factor cladding of the experiment with subsequent regression analysis was used in the work. The criterion for optimality of a plan in orthogonal central compositional planning is the orthogonality of the columns of the planning matrix. For the experiment, the following factors are selected: I – current strength (A), T_{on} – pulse time (μ s), T_{av} – pulse fill factor (%). According to the carried out experiment and the subsequent regression analysis, a model is obtained for calculating the size of the lateral gap. On the basis of the obtained data, it becomes possible to predict the correction value when processing steel 38X2H2MA. The analysis of the model showed that the size of the gap is affected not only by the factors themselves, but also by their totality. A geometric representation of the law of variation of the lateral clearance value is presented depending on the erosion control modes. The received data allow to make adjustments of the electrode-tool dimensions in order to provide the given parameters of processing accuracy.

Keywords: electrical discharge machining, electrode-tool, accuracy, quality, factor experiment, regression analysis, empirical model, dependence, voltage, impulse, processing modes.

При копировально-прошивной электроэрозионной обработке (ЭЭО) деталей машин и механизмов форма обрабатываемой поверхности повторяет форму электрода-инструмента (ЭИ) [1–3].

В связи с тем, что ЭЭО является бесконтактным методом обработки, при внедрении ЭИ в обрабатываемую заготовку между торцевыми и боковыми поверхностями электрода-инструмента и формируемой полости образуются соответственно торцевой l_t и боковой l_b зазоры (рис. 1). Основными факторами, влияющими на величину зазоров, являются режимы обработки и материал электродов [1].

Как показано в работах [1, 4–9], под действием высоких температур происходит фазовый переход обрабатываемого материала из твердого состояния в парообразное. Пары металла при взаимодействии с рабочей жидкостью, заполняющей межэлектродное пространство, твердеют и формируют электроэрозионный шлам. В связи с попаданием шлама в межэлектродный промежуток фактическая величина меж-

электродного зазора δ будет меньше l_6 на сумму размеров продуктов эрозии $\sum d_i$, расположенных в данном сечении:

$$\delta = l_6 - \sum d_i, \quad (1)$$

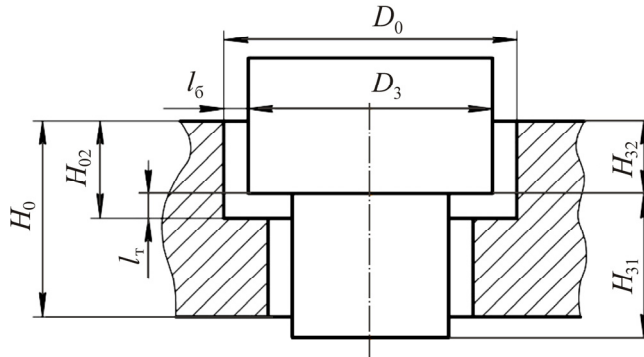


Рис. 1. Расчетная схема ЭИ при обработке отверстий

В этом случае с обрабатываемой поверхности будет снят большой слой металла [1].

При обработке материалов на проволочно-вырезном электроэрозионном станке величина зазора уменьшается при увеличении мощности импульса (рис. 2).

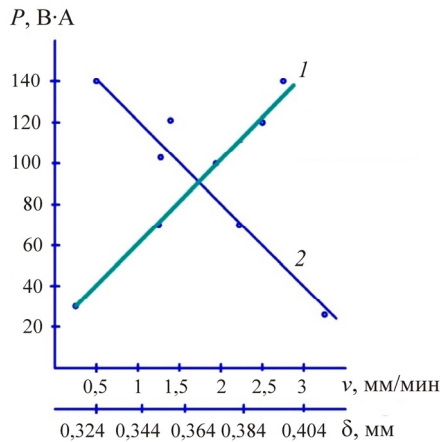


Рис. 2. Зависимости скорости резанья v (1) и ширины зазора δ (2) от мощности

Данное явление объясняется тем, что при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке используется постоянно сматывающийся нежесткий электрод-проволока. Увеличение мощности в зазоре ведет к увеличению скорости резанья, следовательно, электрод-проволока проходит обрабатываемый участок быстрее. Снижение скорости резанья приводит к тому, что на обрабатываемом участке поверхности концентрируется большая тепловая энергия, увеличивается вероятность возникновения вторичных искровых разрядов и, как следствие, увеличивается ширина реза [10, 11].

В работах [1, 12] показано, что при обработке на копировально-прошивном станке используется фасонный ЭИ, совершающий возвратно-поступательное движение с целью обеспечения наилучшей прокачки рабочей жидкостью зоны обработки. Увеличение энергии импульса способствует увеличению износа ЭИ, что ведет к изменению величины межэлектродного зазора, в связи с чем снижается точность обработки. Интенсивность износа ЭИ увеличивается при обработке хромсодержащих сталей с повышенной электроэрозионной стойкостью. Сложный компонентный состав высоколегированных хромсодержащих сталей не позволяет прогнозировать выходные параметры обработанной поверхности и назначать режимы обработки, обеспечивающие заданные показатели точности, путем применения технологических таблиц и существующих методик расчета режимов ЭЭО.

Актуальной задачей является прогнозирование величины межэлектродного зазора при обработке хромсодержащих сталей в зависимости от режимов копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Целью исследования является получение эмпирической модели для расчета величины межэлектродного зазора при обработке стали 38Х2Н2МА.

Материалы и методы исследования

В качестве обрабатываемого материала выбрана конструкционная легированная сталь 38Х2Н2МА по ГОСТ 4543–71. Шероховатость обрабатываемой поверхности до ЭЭО $Ra = 3,6$ мкм. Толщина заготовки 3 мм. Обработка заготовки проходила на копировально-прошивном электроэрозионном станке Electronica Smart CNC. Рабочая жидкость – масло И-20А [12].

В качестве материала электрода-инструмента выбрана медь марки М1 по ГОСТ 1173–2006. Площадь рабочей поверхности ЭИ составляет 100 мм². При проведении эксперимента электрод-инструмент осуществлял сквозной прожиг заготовки.

Для получения эмпирической модели использована методика факторного планирования эксперимента с последующим регрессионным анализом.

Критерием оптимальности плана в ортогональном центральном композиционном планировании (ОЦКП) является ортогональность столбцов матрицы планирования. В силу этой ортогональности все коэффициенты регрессии оцениваются независимо друг от друга [13–15].

При планировании эксперимента значения факторов кодируются путем линейного преобразования координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку и выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов.

Для проведения эксперимента выбраны следующие факторы:

- 1) сила тока I , А;
- 2) время действия импульса T_{on} , мкс;
- 3) коэффициент заполнения импульсами T_{au} , %.

Кодированные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Кодирование параметров

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Средний уровень	Нижнее «звездное» плечо	Верхнее «звездное» плечо
I , А	3	21	12	1	23
T_{on} , мкс	0,5	500	250	0.25	1000
T_{au} , %	3	21	12	1	23

Зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид

$$N = 2^k + 2k + 1 = 15, \quad (2)$$

где N – число опытов; k – число факторов.

Выходным параметром является величина бокового зазора. Величина зазора рассчитывалась как разность между длинными размерами обработанного паза и ЭИ.

В каждой точке факторного пространства проводится по три параллельных опыта ($y = 3$).

Матрица планирования с учетом кодирования факторов при значении «звездного» плеча $\alpha = 1,215$ представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица ОКЦП

№ п/п	X_0	X_1 (I, A)	X_2 (T_{on} , мкс)	X_3 (T_{au} , мкс)	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X'_4	X'_5	X'_6
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27
9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0,746	-0,73	-0,73
10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0,746	-0,73	-0,73
11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	0,746	-0,73
12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	0,746	-0,73
13	+1	0	0	-1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	0,746
14	+1	0	0	+1,215	0	0	0	-0,73	-0,73	0,746
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

Для каждой строки матрицы планирования по результатам экспериментов находится среднее арифметическое значение параметра оптимизации

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^k y_{ji}}{h}, \quad (3)$$

где \bar{y}_j – значение функции отклика; j – номер опыта; i – номер параллельного опыта; h – количество параллельных опытов.

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляется выборочная дисперсия

$$S_j^2 = \frac{1}{h-1} \cdot \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2. \quad (4)$$

Ошибка опыта рассчитывается по следующей формуле:

$$\sqrt{S_j^2} = S_j. \quad (5)$$

Для проверки однородности дисперсии применен критерий Кохрена (уровень значимости $\alpha = 0,05$):

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{j\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_j^2} < G_{\text{табл}}, \quad (6)$$

где $S_{j\text{max}}^2$ – максимальное значение выборочной дисперсии.

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_j^2}{N} = 3,1816 \cdot 10^{-4}. \quad (7)$$

По результатам эксперимента вычисляются коэффициенты модели

$$b_p = \frac{\sum_{j=1}^N x_{pj} \bar{y}_j}{\sum_{j=1}^N x_{pj}^2}, \quad (8)$$

где p – номер фактора; x_{pj} – кодированные значения факторов p в j -м эксперименте.

Оценка значимости коэффициентов производится по критерию Стьюдента.

Гипотеза адекватности полученной модели проверяется по критерию Фишера.

Согласно проведенному эксперименту и последующему регрессионному анализу получена модель для расчета величины бокового зазора:

$$Y = 0,03449 + 0,00028I^2 - 0,0003IT_{au} - 0,0031I + 0,00012T_{on}T_{au} - 0,00138T_{on} - 0,00034T_{au}^2 + 0,01008T_{au}. \quad (9)$$

Анализ модели показал, что на величину зазора влияют не только сами факторы, но и их совокупность. Для анализа эмпирической модели необходимо представить ее в виде гиперповерхности. Для удобства восприятия полученных данных рассечем четырехмерное пространство трехмерными пространствами (при различных значениях силы тока $I = 3, 12, 21$ А), проецируя на него функцию отклика (рис. 3–5). Ряд последовательных проекций позволит геометрически изобразить закон изменения величины бокового зазора в зависимости от режимов электроэрозионной обработки.

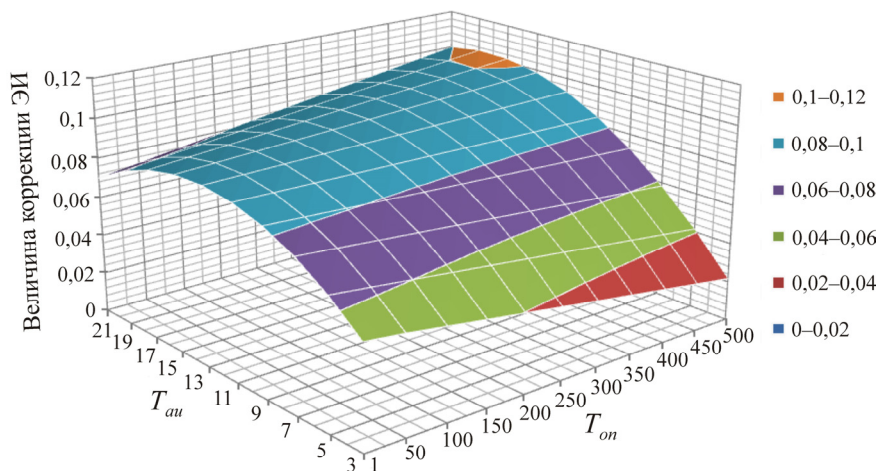


Рис. 3. Гиперповерхность при $I = 3$ А

Из графика следует, что при изменении значения коэффициента заполнения T_{au} значение функции отклика Y меняется по квадратичной зависимости (см. рис. 3). При изменении длительности импульса T_{on} значение величины коррекции Y изменяется по линейной зависимости.

Показано, что максимальное значение полинома $Y_{\max} = 0,10217$ мм достигается при $T_{au} = 19$ мкс, $T_{on} = 500$ мкс; минимальное значение полинома $Y_{\min} = 0,02169$ мм достигается при $T_{au} = 3$ мкс, $T_{on} = 500$ мкс.

Из анализа изменения величины зазора при силе тока 12 А следует, что взаимосвязь режимов резания и параметра Y характеризуется квадратичной функцией (см. рис. 4). Установлено, что максимальное значение функции отклика $Y_{\max} = 0,06803$ достигается при $T_{au} = 15$ мкс, $T_{on} = 500$ мкс; минимальное значение полинома $Y_{\min} = 0,02333$ мм достигается при $T_{au} = 3$ мкс, $T_{on} = 500$ мкс.

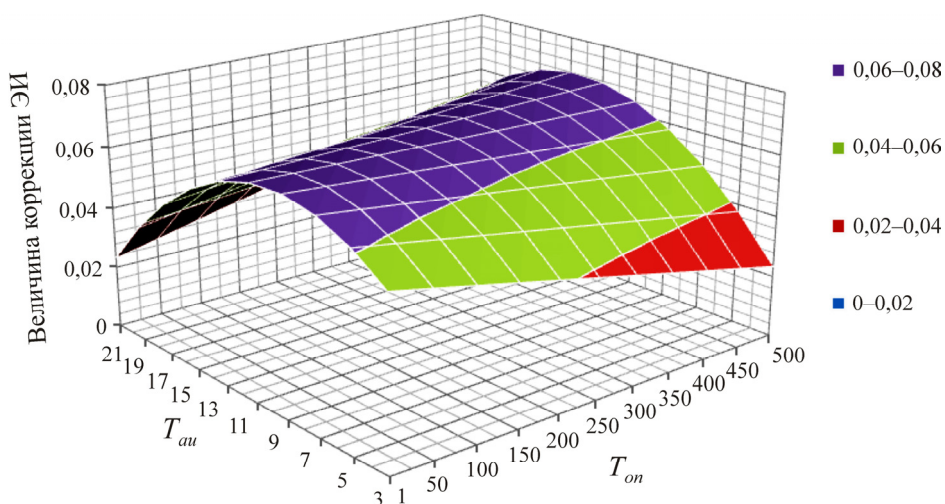


Рис. 4. Гиперповерхность при $I = 12$ А

Влияние длительности импульсов T_{on} на формирование величины коррекции ЭИ при $I = 21$ А носит линейный характер (см. рис. 5). Установлено, что максимальное значение величины коррекции $Y_{\max} = 0,10217$ мм достигается при $T_{au} = 5$ мкс, $T_{on} = 1$ мкс; минимальное значение $Y_{\min} = 0,02169$ мм достигается при $T_{on} = 1$ мкс, $T_{au} = 21$ мкс.

На основе полученных данных становится возможным прогнозирование величины коррекции при обработке стали 38Х2Н2МА. Полученные данные позволяют производить корректировку размеров элек-

трода-инструмента с целью обеспечения заданных показателей точности обработки.

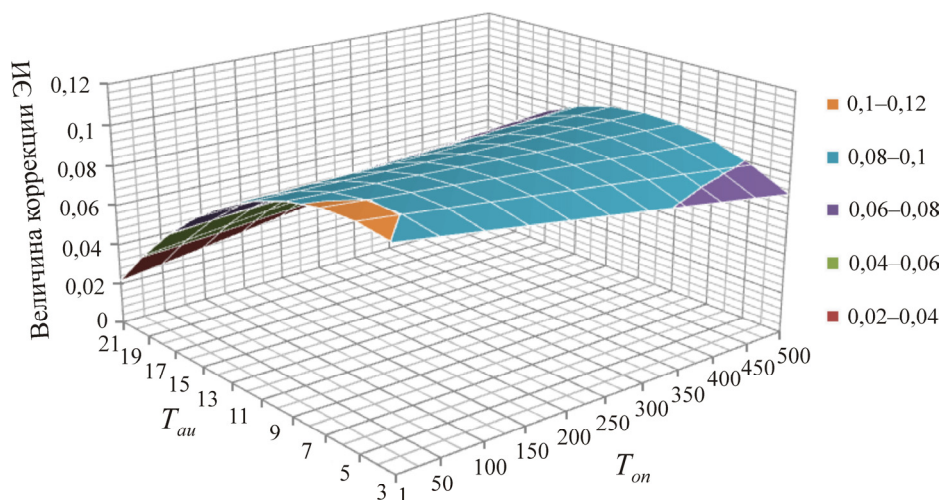


Рис. 5. Гиперповерхность при $I = 21$ А

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-5310.2016.8.

Список литературы

1. Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 112 с.
2. Серебrenицкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 228 с.
3. Журиh А.В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2005. – 132 с.
4. Металлографический анализ морфологии продуктов эрозии / Т.Р. Абляз, С.А. Оглезнева, Н.Д. Оглезнев, А.О. Гришарин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 52–62.
5. Cetin S., Okada A., Uno Y. Effect of debris distribution on wall concavity in deep-hole EDM // JSME International Journal Series C. – 2004. – Vol. 47. – P. 553.
6. Schumacher B.M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed // J. Matl. Proc. Tech. – 2004. – Vol. 149. – P. 376–381.

7. Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari Md.F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2007. – Vol. 47. – P. 1214–1228.
8. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining / S. Hayakawa, Y. Sasaki, F. Itoigawa, T. Nakamura // *Proc. of the 17th CIRP Conf. on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*. – 2013. – P. 174–179.
9. Liao Y.S., Wu P.S., Liang F.Y. Study of debris exclusion effect in linear motor equipped die-sinking EDM process. *Procedia CIRP* 6. – 2013. – P. 123–128.
10. Ablyaz T.R., Lesnikov R.V. Influence of the wire EDM conditions on the cut width // *Russian Engineering Research*. – 2016. – Vol. 36, № 9. – P. 786–787.
11. Ablyaz T.R., Muratov K R., Zhurin A.V. Study of a process of a component surface layer changes during wire electrical discharge machining // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P. 40814–40823.
12. Абляз Т.Р., Борисов Д.А. Влияние шероховатости рабочей поверхности электрода-инструмента на производительность электроэрозионной обработки стали 38x2H2MA // *СТИН*. – 2017. – № 3. – С. 19–22.
13. Лосев В.А. Многофакторное планирование эксперимента. – Пермь, 1985. – 28 с.
14. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.Г. Соломенцев, В.Г. Митрофанов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
15. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2002. – 166 с.

References

1. Abliaz T.R., Khanov A.M., Khurmatullin O.G. *Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov* [Modern approaches to technology of electroerosive processing of materials]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 112 p.
2. Serebrenitskii P.P. *Sovremennye elektroerozionnye tekhnologii i oborudovanie: uchebnoe posobie* [Modern electroerosive technologies and equipment: manual]. Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Saint-Petersburg, 2007, 228 p.
3. Zhurin A.V. *Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke* [Methods of calculation of technological parameters and electrodes tools at electroerosive processing]. Ph. D. thesis. Tula, 2005, 132 p.
4. Abliaz T.R., Oglezneva S.A., Ogleznev N.D., Grisharin A.O. *Metallograficheskii analiz morfologii produktov erozii* [Metalgraphic analysis of morphology of products of an erosion]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 3, 52–62 pp.
5. Cetin S., Okada A., Uno Y. Effect of debris distribution on wall concavity in deep-hole EDM. *JSME International Journal Series C*, 2004, vol. 47, 553 p.
6. Schumacher B.M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. *Journal Matl. Proc. Tech.*, 2004, vol. 149, 376–381 pp.

7. Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari Md.F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal Mach. Tools Manuf.*, 2007, vol. 47, 1214–1228 pp.

8. Hayakawa S., Sasaki Y., Itoigawa F., Nakamura T. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining. *Proc. of the 17th CIRP Conf. on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, 2013, 174–179 pp.

9. Liao Y.S., Wu P.S., Liang F.Y. Study of debris exclusion effect in linear motor equipped die-sinking EDM process. *Procedia CIRP* 6. 2013, 123–128 pp.

10. Ablyaz T.R., Lesnikov R.V. Influence of the wire EDM conditions on the cut width. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 9, 786–787 pp.

11. Ablyaz T.R., Muratov K.R., Zhurin A.V. Study of a process of a component surface layer changes during wire electrical discharge machining. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, 40814–40823 pp.

12. Abliaz T.R., Borisov D.A. Vliianie sherokhovatosti rabochei po-verkhnosti elektroda-instrumenta na proizvoditel'nost' elektroerozionnoi obrabotki stali 38kh2N2MA [Influence of a roughness of a working surface of an electrode tool on productivity of electroerosive processing of steel 38x2H2MA]. *Stanki i instrumenty*, 2017, no. 3, 19–22 pp.

13. Losev V.A. Mnogofaktornoe planirovanie eksperimenta [Multiple-factor planning experiment]. Perm', 1985, 28 p.

14. Solomentsev Iu.G., Mitrofanov V.G. et. al. Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami [Adaptive management of technological processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 536 p.

15. S"ianov S.Iu. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnostnogo sloia detalei pri elektroerozionnoi obrabotke [Technological support of quality of a blanket of details at electroerosive processing]. Ph.D. thesis. Briansk, 2002, 166 p.

Получено 3.04.2017

Об авторах

Абляз Тимур Ризович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Шлыков Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Kruspert@mail.ru.

Борисов Денис Андреевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Шумков Алексей Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Shumkov_89@mail.ru.

Летягин Игорь Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: letyagin@pstu.ru.

About the authors

Timur R. Ablyaz (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Evgeniy S. Schlykov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Kruspert@mail.ru.

Denis A. Borisov (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Aleksei A. Shumkov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Shumkov_89@mail.ru.

Igor Yu. Letyagin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: letyagin@pstu.ru.