

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.12

УДК 621.9

А.Н. Анিকেев¹, Т.Р. Абляз²

¹Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

²Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СКОРОСТИ СМОТКИ ЭЛЕКТРОДА-ПРОВОЛОКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Объектом исследования является процесс формирования шероховатости обработанной поверхности при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке (ПВЭЭО). Шероховатость обработанной поверхности при ПВЭЭО зависит от множества факторов: свойств рабочей жидкости, свойств обрабатываемого материала, свойств электрода-проволоки, параметров импульса (время включения и выключения импульса, напряжение в зазоре, сила тока и др.), скорости смотки проволоки, высоты обрабатываемой заготовки и др. Принимая во внимание множество факторов ПВЭЭО, влияющих на формирование шероховатости обработанной поверхности, для анализа взаимосвязи целесообразно применять методику планирования эксперимента. Целью работы является экспериментальное исследование влияния напряжения и скорости смотки электрода-проволоки на формирование шероховатости обработанной поверхности при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке. Экспериментальное исследование проводится по методу полного факторного эксперимента. В качестве основных факторов для проведения эксперимента выбраны скорость смотки электрода-проволоки (м/мин) и напряжение в зазоре (В). В работе показано, что при увеличении напряжения U при обработке титана марки ВТЗ и стали марки 09Г2С шероховатость обработанной поверхности R_a (мкм) увеличивается. Установлено, что при увеличении напряжения U при обработке алюминия и стали марки 40ХН2М2 шероховатость обработанной поверхности R_a (мкм) уменьшается. При увеличении скорости смотки проволоки v (м/мин) при обработке алюминия и титана марки ВТЗ шероховатость обработанной поверхности R_a (мкм) уменьшается в малых диапазонах. Определено, что исследуемый параметр – скорость подачи проволоки v (м/мин) – при обработке сталей марок 09Г2С и 40ХН2МА не оказывает существенного влияния на формирование шероховатости обработанной поверхности.

Ключевые слова: проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, электрод-проволока, шероховатость, качество, факторный эксперимент, регрессионный анализ, эмпирическая модель, зависимость, напряжение, импульс, режимы обработки.

A.N. Anikeev¹, T.R. Abliaz²

¹South Ural State University (National Research University),
Cheliabinsk, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INFLUENCE OF VOLTAGE AND WIRE SPEED ON FORMING THE MACHINED SURFACE ROUGHNESS DURING WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The object of research is the process of formation of the roughness of the machined surface during wire electrical discharge machining (WEDM). The roughness of the machined surface by WEDM depends on many factors: the properties of the working fluid, the properties of the material being processed, the properties of the electrode-wire, pulse parameters (the time of turning on and off a pulse voltage in the gap, current, etc.)., The wire speed, the height of the workpiece and others. Taking into account the many factors influencing the formation of WEDM roughness of the machined surface for the analysis of the relationship is the use of appropriate techniques of experimental design. The aim is to study the influence of experimental stress and wire speed formation surface finish at wire-wire electric discharge machining. Experimental research is conducted by the method of full factorial experiment. The main factors selected for the experiment, select the wire speed (m/min) and the gap voltage (B). It is shown that an increase in voltage U , in the processing of titanium VT3 and Steel 09G2S, machined surface roughness R_a , microns increases. It is found that increasing the voltage U , in the processing of aluminum and steel 40HN2M2, machined surface roughness R_a , microns decreases. By increasing the speed of wire winding v (m/min), treated aluminum, and titanium VT3, machined surface roughness R_a , microns decreases in low ranges. It was determined that the monitoring parameter wire speed v (m/min) when processing steel grade 09G2S and 40HN2MA has no significant effect on the formation of the roughness of the machined surface.

Keywords: wire cut EDM, electrode wire, roughness, quality, factorial experiment, regression analysis, empirical model, dependency, voltage, impulse, cutting conditions.

Технология проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО) позволяет изготавливать детали сложной геометрической формы с высокой точностью и низкой шероховатостью. Современные ПВЭЭ станки позволяют обеспечивать изготовление деталей, соответствующих 12-му классу шероховатости [1]. В связи с этим ПВЭЭО широко применяется на ведущих машиностроительных предприятиях.

Процесс электроэрозионной обработки является сложным электрофизическим процессом [1–8]. Шероховатость обработанной поверхности при ПВЭЭО зависит от множества факторов: свойств рабочей жидкости, свойств обрабатываемого материала, свойств электрода-проволоки, параметров импульса (время включения и выключения импульса, напряжение в зазоре, сила тока и др.), скорости смотки проволоки, высоты обрабатываемой заготовки и др. [9–10].

Принимая во внимание множество факторов ПВЭЭО, влияющих на формирование шероховатости обработанной поверхности, для анализа взаимосвязи целесообразно применение методики планирования эксперимента [2, 5, 11].

В работах [11, 12] получены эмпирические модели, позволяющие оценить влияние режимов электроэрозионной обработки (время включения и выключения импульсов), высоты обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала на шероховатость обработанной поверхности после ПВЭЭО. В работах [11, 13–20] показано, что значение шероховатости R_a (мкм) обработанной поверхности обратно пропорционально скважности импульсов. При увеличении времени включения импульсов t_{on} (мкс) и снижении времени выключения импульсов t_{off} (мкс) увеличивается значение шероховатости обработанной поверхности. Установлено, что при ПВЭЭО материалов с высоким коэффициентом теплопроводности шероховатость обрабатываемой поверхности R_a (мкм) увеличивается. Увеличение высоты обрабатываемой заготовки ведет к увеличению шероховатости обработанной поверхности. При увеличении высоты обрабатываемой заготовки с 50 до 80 мм R_a (мкм) увеличивается в 1,1 раза. Полученная в работе эмпирическая модель позволяет оценить влияние лишь некоторых параметров процесса ПВЭЭО на шероховатость обработанной поверхности. Для расширения знаний в области изучения процесса ПВЭЭО и прогнозирования параметров качества обработанной поверхности необходимо провести дополнительные исследования.

В работе [11] показано, что увеличение значения шероховатости при ПВЭЭО связано с неравномерностью распределения межэлектродного зазора (МЭЗ) в процессе обработки в связи с попаданием электроэрозионного шлама в канал пробоя. Чем больше площадь обрабатываемой заготовки, тем больше вероятность скопления шлама в канале пробоя. Наличие продуктов эрозии в канале пробоя является одной из причин возникновения дополнительных искровых разрядов между электродом-проволокой и металлическими частицами уже удаленного материала, что способствует неравномерному формированию шероховатости. На формирование дополнительных искровых разрядов в процессе обработки существенно влияют скорость смотки электрода-проволоки и напряжение в зазоре между электродами.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния напряжения и скорости смотки электрода-проволоки на формирование шероховатости обработанной поверхности при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке.

Экспериментальное исследование проводится по методу полного факторного эксперимента.

Необходимое количество экспериментов N рассчитывается по формуле [17]

$$N = n^k, \quad (1)$$

где n – количество уровней; k – число факторов.

В качестве факторов, выбранных для проведения факторного анализа, определены следующие параметры:

- 1) напряжение в зазоре U (В);
- 2) скорость подачи проволоки v (м/мин).

Варьирование факторов осуществляется на двух уровнях (верхнем и нижнем). Согласно уравнению (1) количество опытов равняется четырем.

В табл. 1 представлены уровни факторов и их кодовые обозначения.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)	
$U, \text{ В}$	x_1	60	45	30	15
$v, \text{ м/мин}$	x_2	5	3	1	2

Зависимость Ra (мкм) от исследуемых факторов представлена линейным уравнением вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_2x_1x_2, \quad (2)$$

где y – показатель качества обработанной поверхности (шероховатость обработанной поверхности Ra); x_1, x_2 – кодированные значения факторов U, v соответственно; b – коэффициент регрессии.

Для проведения экспериментов используются четыре обрабатываемых материала:

- 1) титан марки ВТЗ по ГОСТ 19807–91;

- 2) алюминий чистый Al по ГОСТ 4784–97;
- 3) сталь марки 09Г2С по ГОСТ 19281–89;
- 4) сталь марки 40ХН2МА по ГОСТ 4543–71.

Коэффициенты теплопроводности λ (Вт/мК) представленных материалов приведены ниже.

Коэффициенты теплопроводности материалов:

Материал	λ , Вт/мК
Титан марки ВТЗ	7,1
Алюминий чистый Al	9,4
Сталь марки 09Г2С	0,04
Сталь марки 40ХН2МА	0,14

Заготовки выполнены в виде листов прямоугольного сечения. Толщина одной заготовки 8 мм.

Экспериментальное исследование проводилось на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Eсо Cut.

Измерение шероховатости обработанной поверхности проводилось по ГОСТ 2789–73, в качестве оборудования выбран профилометр Mahr Perthometer S2.

В качестве электрода-инструмента выбрана электроэрозионная проволока Весо Cut (диаметр 0,25 мм). Обработка проводилась в дистиллированной воде.

Для повышения точности проведения экспериментов каждый опыт в середине интервала варьирования параметров повторялся три раза.

Полученные эмпирические зависимости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Регрессионные модели

Номер модели	Обрабатываемый материал	Эмпирическая модель
1	ВТЗ	$Ra = 10^{-6} \cdot (2,265 + 0,001U - 0,105v + 0,002Uv)$
2	Al	$Ra = 10^{-6} \cdot (3,27 - 0,01U + 0,08v - 0,002Uv)$
3	09Г2С	$Ra = 10^{-6} \cdot (0,67 + 0,011U)$
4	40ХН2МА	$Ra = 10^{-6} \cdot (1,77 - 0,011U)$

Анализ зависимостей (см. табл. 2) показал:

1. На формирование шероховатости поверхности при обработке титана марки ВТЗ и алюминия Al оказывают влияние все исследуемые

факторы (напряжение в зазоре и скорость смотки проволоки), а также их совместное взаимодействие.

2. На формирование шероховатости поверхности при обработке сталей марок 09Г2С и 40ХН2МА оказывает влияние только один исследуемый фактор (напряжение в зазоре). При математической обработке регрессионных моделей коэффициенты, связанные с параметром «скорость подачи проволоки», считаются статистически незначительными и исключаются из уравнения регрессии, так как их значения по абсолютной величине получились намного меньше доверительного интервала. Стоит отметить, что причиной незначительного влияния скорости смотки проволоки при обработке сталей могла стать высота обрабатываемой детали.

На основе полученных зависимостей построены графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от параметров модели.

На рис. 1 представлен график зависимости шероховатости R_a (мкм) обработанной поверхности ВТЗ от факторов, рассмотренных в модели.

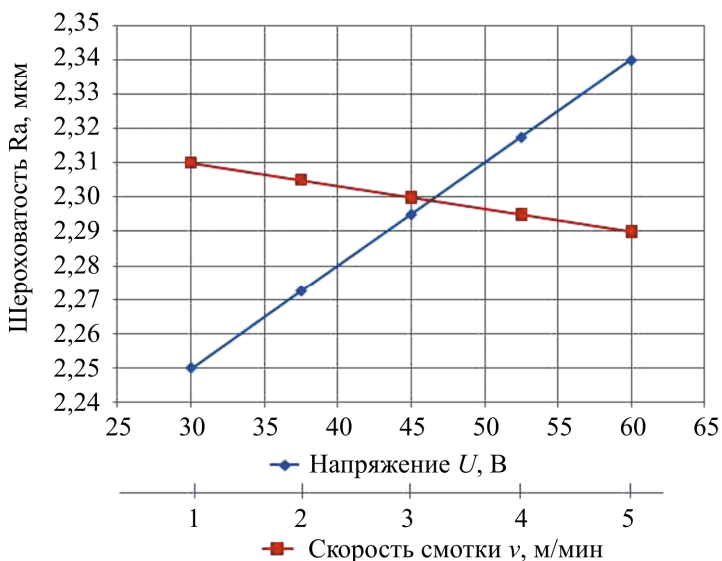


Рис. 1. Зависимость шероховатости обработанной поверхности титана от условий ПВЭО

Из анализа графиков следует, что шероховатость поверхности прямо пропорциональна напряженности поля при обработке титана марки ВТЗ. Увеличение напряженности поля приводит к увеличе-

нию значения шероховатости обработанной поверхности. Из проведенных экспериментов установлено, что процесс резания титана с минимальным напряжением поля характеризуется повышенной производительностью.

Из графика видно, что при увеличении скорости смотки проволоки уменьшается шероховатость обработанной поверхности. Чем больше скорость смотки проволоки, тем быстрее происходит удаление продуктов эрозии из межэлектродного зазора. Отсутствие дополнительных искровых разрядов между электродом-инструментом и металлическими частицами уже удаленного материала способствует более равномерному формированию шероховатости обрабатываемой поверхности. Показано, что влияние скорости смотки проволоки на формирование шероховатости при обработке титана марки ВТЗ оказалась несущественной.

График зависимости шероховатости обработанной поверхности алюминия от факторов, рассмотренных в модели, представлен на рис. 2.

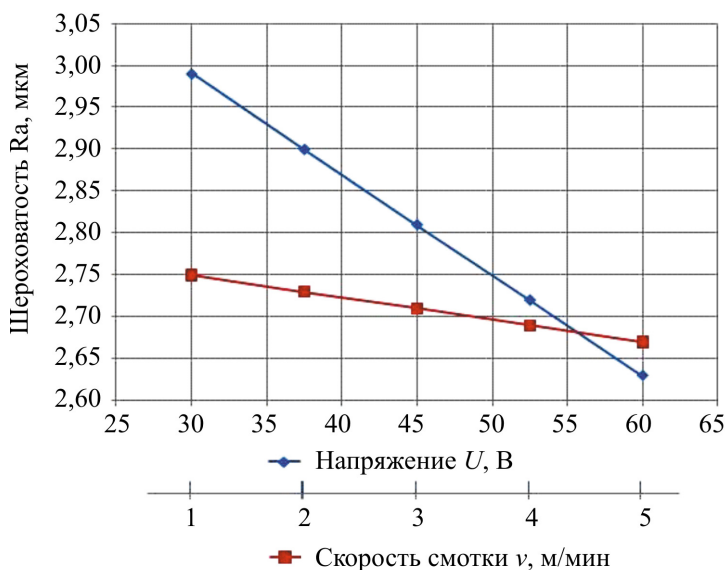


Рис. 2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности алюминия от условий ПВЭЭО

Из анализа графиков следует, что шероховатость поверхности обратно пропорциональна напряженности поля при обработке чистого алюминия. Увеличение напряженности поля приводит к уменьшению

значения шероховатости обработанной поверхности. Для значения напряженности поля 30 В шероховатость поверхности заготовки из алюминия составляет 2,99 мкм. При увеличении напряженности поля до значения 60 В величина шероховатости повышается до значения 2,63 мкм. Из проведенных экспериментов установлено, что процесс резания с минимальным напряжением поля характеризуется повышенной производительностью.

Из графика видно, что при увеличении скорости смотки проволоки уменьшается шероховатость обработанной поверхности. Чем больше скорость смотки проволоки, тем быстрее происходит удаление продуктов эрозии из МЭЗ. Отсутствие дополнительных искровых разрядов между электродом-инструментом и металлическими частицами уже удаленного материала способствует более равномерному формированию шероховатости обрабатываемой поверхности. Показано, что влияние скорости смотки проволоки на формирование шероховатости при обработке чистого алюминия оказалась несущественной.

График зависимости шероховатости обработанной поверхности стали 09Г2С от напряженности поля U представлен на рис. 3.

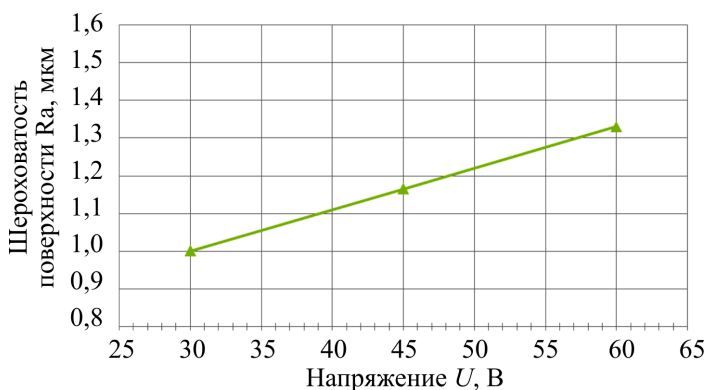


Рис. 3. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от параметра напряженности поля U при обработке стали 09Г2С

Показано, что шероховатость поверхности прямо пропорциональна напряженности поля при обработке стали марки 09Г2С. Увеличение напряженности поля при обработке стали марки 09Г2С приводит к увеличению значения шероховатости обработанной поверхности. Для значения напряженности поля 30 В шероховатость поверхности составляет 1,00 мкм. При увеличении напряженности поля до значения

60 В величина шероховатости повышается до значения 1,33 мкм для стали марки 09Г2С.

График зависимости шероховатости обработанной поверхности стали 40ХН2МА от напряженности поля U представлен на рис. 4.

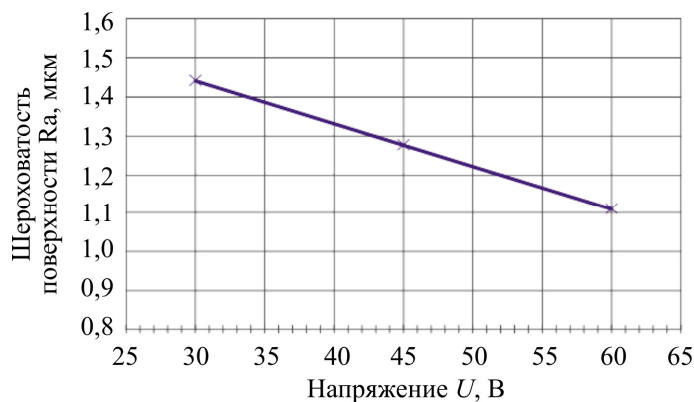


Рис. 4. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от параметра напряженности поля U при обработке стали марки 40ХН2МА

Из анализа графика следует, что шероховатость поверхности обратно пропорциональна напряженности поля при обработке стали марки 40ХН2МА. Увеличение напряженности поля при обработке стали марки 40ХН2МА приводит к уменьшению значения шероховатости обработанной поверхности. Для значения напряженности поля 30 В шероховатость поверхности составляет 1,44 мкм. При увеличении напряженности поля до значения 60 В величина шероховатости повышается до значения 1,11 мкм для стали марки 40ХН2МА.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Получены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать шероховатость обработанной поверхности в процессе резания различных металлов.

2. При увеличении напряжения в зазоре U при обработке титана марки ВТЗ и стали марки 09Г2С шероховатость обработанной поверхности R_a (мкм) увеличивается.

3. При увеличении напряжения в зазоре U при обработке алюминия и стали марки 40ХН2М2 шероховатость обработанной поверхности R_a (мкм) уменьшается.

4. При увеличении скорости смотки проволоки v (м/мин) при обработке чистого алюминия и титана марки ВТЗ шероховатость обработанной поверхности Ra (мкм) уменьшается в малых диапазонах.

5. Установлено, что исследуемый параметр – скорость подачи проволоки v (м/мин) – при обработке сталей марок 09Г2С и 40ХН2МА не оказывает существенного влияния на формирование шероховатости обработанной поверхности.

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. Артамонов Б.А., Волков Ю.С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. Ч. 2. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка / Всерос. науч.-исслед. ин-т патентной информации. – М., 1991. – 144 с.

3. Журин А.В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук / Тул. гос. ун-т. – Тула, 2005. – 132 с.

4. Кабалдин Ю.Г., Сариллов М.Ю., Биленко С.В. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта / Комсом.-на-Амуре гос. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 2007. – 191 с.

5. Лосев В.А. Многофакторное планирование эксперимента. – Пермь, 1985. – 28 с.

6. Серебренницкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 228 с.

7. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.Г. Соломенцев, В.Г. Митрофанов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

8. Схиртладзе А.Г., Ярушин С.Г. Технологические процессы в машиностроении: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 496 с.

9. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук / Брянск. гос. техн. ун-т. – Брянск, 2002. – 166 с.

10. Фотеев Н.К. Управление качеством поверхности технологической оснастки при электроэрозионной обработке // *Электронная обработка материалов*. – 1994. – № 2. – С. 5–7.
11. Абляз Т.Р. Разработка модели по расчету шероховатости обработанной поверхности при проволочно-вырезной электроэрозионной резке // *СТИН*. – 2016. – № 1. – С. 26–28.
12. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototype into direct digital manufacturing. – New York: Springer, 2010. – Ch. 9 – P. 237–258.
13. Justin D., Stucker B. Improving implants using laser-based metal deposition technologies // *BONEZone*. – 2006. – Spring. – P. 22–25
14. Kinoshita N., Fukui M., Kimura Y. Study on wire-EDM: inprocess measurement of mechanical behaviour of electrode-wire // *Ann. CIRP* 33. – 1984. – № 1. – P. 89–92.
15. Kunieda M., Takeshita S., Okumiya K. Study on wire electrode temperature in WEDM // *Proceedings of International Symposium for Electromachining – ISEM XII*. – 1998. – P. 151–161.
16. Liao Y.S., Huang J.T., Su H.C. A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining // *J. Mater. Process. Technol.* – 1997. – № 71. – P. 487–493.
17. Rajurkar K.P., Wang W.M., Thermal modeling and online monitoring of wire-EDM // *J. Mater. Process. Technol.* – 1993. – № 38(1–2). – P. 417–430.
18. Scott D., Boyina S., Rajurkar K.P. Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining // *Int. J. Prod. Res.* – 1991. – № 29(11). – P. 2189–2207.
19. Spedding T.A., Wang Z.Q. Parametric optimization and surface characterization of wire electrical discharge machining process // *Precis. Eng.* – 1997. – № 20(1). – P. 5–9.
20. Tarng Y.S., Ma S.C., Chung L.K. Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 1995. – № 35(129). – P. 1693–1701.

References

1. Abliaz T.R., Khanov A.M., Khurmatullin O.G. *Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to the technology of electrical discharge machining of materials]*. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universit, 2012. 112 p.

2. Artamonov B.A., Volkov Iu.S. Analiz modelei protsessov elektrokhimicheskoi i elektroerozionnoi obrabotki. Chast' 2. Modeli protsessov elektroerozionnoi obrabotki. Provolochnaia vyrezka [Analysis of models of processes of electrochemical and electrical machining. Part 2. Models of processes of EDM. Wire cutting]. Moscow: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut patentnoi informatsii, 1991. 144 p.

3. Zhurin A.V. Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke [Methods of calculation of technological parameters and tool electrode in EDM process]. Ph. D. thesis. Tul'skii gosudarstvennyi universitet, 2005. 132 p.

4. Kabaldin Iu.G., Sarilov M.Iu., Bilenko S.V. Povyshenie ustoichivosti protsessa elektroerozionnoi obrabotki i kachestva obrabotannoi poverkhnosti na osnove podkhodov iskusstvennogo intellekta [Improving the sustainability of the process of electrical discharge machining and quality of treated surface based on artificial intelligence approaches]. Komsomol'sk-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 191 p.

5. Losev V.A. Mnogofaktornoe planirovanie eksperimenta [Multifactorial experiment planning]. Perm', 1985. 28 p.

6. Serebrenitskii P.P. Sovremennye elektroerozionnye tekhnologii i oborudovanie [Electro-technology and modern equipment]. Saint Petersburg: Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 228 p.

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

8. Skhirtladze A.G., Iarushin S.G. Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii [Technological processes in mechanical engineering]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006. 496 p.

9. S"ianov S.Iu. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnostnogo sloia detalei pri elektroerozionnoi obrabotke [Technological support of surface layer quality of parts at EDM processing]. Ph. D. thesis. Brianskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2002. 166 p.

10. Foteev N.K. Upravlenie kachestvom poverkhnosti tekhnologicheskoi osnastki pri elektroerozionnoi obrabotke [Quality control of technological surface tooling at electro erosion processing]. *Elektronnaia obrabotka materialov*, 1994, no. 2, pp. 5-7.

11. Abliaz T.R. Razrabotka modeli po raschetu sherokhovatosti obrabotannoi poverkhnosti pri provolochno-vyreznoi elektroerozionnoi rezke [Development of a model for the calculation of the roughness of the treated

surface during wire electrical discharge machining]. *Stanki Instrument*, 2016, no 1, pp. 26-28.

12. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototype intodirectdigitalmanufacturing. New York: Springer, 2010, Ch. 9, pp. 237-258.

13. Justin D., Stucker B. Improving implants using laser-based metal deposition technologies. *BONEZone*, 2006, Spring, pp. 22-25.

14. Kinoshita N., Fukui M., Kimura Y. Study on wire-EDM: in process measurement of mechanical behavior of electrode-wire. *Ann. CIRP-33*, 1984, no. 1, pp. 89-92.

15. Kunieda M., Takeshita S., Okumiya K. Study on wire electrode temperature in WEDM. *Proceedings of International Symposium for Electromachining. ISEM XII*, 1998, pp. 151-161

16. Liao Y., Huang J., Su H. A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining. *Journal Materials Processing Technology*, 1997, no. 71, pp. 487-493.

17. Rajurkar K., Wang W. Thermal modeling and online monitoring of wire-EDM. *Journal Materials Processing Technology*, 1993, no. 1-2(38), pp. 417-430.

18. Scott D., Boyina S., Rajurkar K. Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining. *International Journal of Production Research*, 1991, no. 29(11), pp. 2189-2207.

19. Spedding T., Wang Z. Parametric optimization and surface charactyrization of wire electrical discharge machining process. *Precision Engineering*, 1997, vol. 20(1), pp. 5-15.

20. Tarng Y., Ma S., Chung L. Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, vol. 35(129), pp. 1693-1701.

Получено 30.01.2016

Об авторах

Аникеев Андрей Николаевич (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технология производства материалов» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета); e-mail: anikeevml@mail.ru.

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

About the authors

Andrei N. Anikeev (Cheliabinsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Technique and Technology of Materials”, South Ural State University (National Research University); e-mail: anikeev-ml@mail.ru.

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