

Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Осинников И.В., Хабарова А.В., Омелин А.А. Прогнозирование качества обработанной поверхности изделий из титановых сплавов после электроэрозионной обработки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 60–67. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.07

Shlykov E.S., Abliaz T.R., Osinnikov I.V., Khabarova A.V., Omelin A.A. Prediction of the quality of the processed surface of products made of titanium alloys after electro-erosive treatment. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 60–67. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 3, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.07
УДК 621.9

Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз, И.В. Осинников, А.В. Хабарова, А.А. Омелин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Целью исследования является повышение качества поверхности изделий из титановых сплавов, обработанных методом копирующе-прошивной электроэрозионной обработки путем подбора рациональных параметров обработки с помощью математической модели, полученной методом факторного эксперимента. В качестве материала электрода-инструмента выбрана медь марки М1 ГОСТ 1173–2006. Обрабатываемый материал – титановый сплав ОТ-4 ГОСТ 19807–91. Данные материалы обладают уникальными свойствами, такими как высокая прочность, низкая теплопроводность, высокая сопротивляемость. Высокие физико-механические свойства титановых сплавов в совокупности с постоянно усложняющимися профилями поверхности изделий ограничивают применение лезвийной обработки. Широко используемым альтернативным методом получения сложнопольных изделий из материалов высокой твердости является метод электроэрозионной обработки. Однако не полностью изучен вопрос прогнозирования качества поверхности, полученной данным методом. Рассмотрена эмпирическая модель, полученная методом факторного эксперимента, позволяющая прогнозировать шероховатость обработанной поверхности. Описана методика проведения экспериментальных исследований, показано используемое оборудование. Приведены варьируемые параметры регрессионного анализа (I , T_{on} , U), составлена матрица планирования, вычислены коэффициенты регрессии, определены значимые коэффициенты, получена эмпирическая модель, проверенная на адекватность. Проведена обратная замена параметров матрицы, получена окончательная модель. Приведены изображения гиперповерхности функции отклика в координатном пространстве при постоянных параметрах I , T_{on} , U . Определен характер изменения функции отклика Ra при изменении параметров. Выявлены предельные значения шероховатости. Получена эмпирическая модель, позволяющая прогнозировать качество поверхности, полученной методом КЭЭО, в зависимости от параметров обработки.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, шероховатость, режимы резания, копирующе-прошивочный станок, факторный анализ, функция отклика, эмпирическая модель, электрод-инструмент, титановый сплав, качество поверхности.

E.S. Shlykov, T.R. Abliaz, I.V. Osinnikov, A.V. Khabarova, A.A. Omelin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**PREDICTION OF THE QUALITY OF THE PROCESSED SURFACE OF PRODUCTS MADE
OF TITANIUM ALLOYS AFTER ELECTRO-EROSIVE TREATMENT**

The aim of the study is to improve the quality of the surface of products made of titanium alloys, processed by the method of copy-piercing electrical discharge machining by selecting rational processing parameters using a mathematical model obtained by the method of factorial experiment. Copper grade M1 GOST 1173-2006 is selected as the material of the electrode tool. Processed material titanium alloy OT-4 GOST 19807-91. This materials have unique properties, such as high strength, low thermal conductivity, high resistance. The high physico-mechanical properties of titanium alloys in combination with the constantly complicating surface profiles of products limit the use of blade processing. A widely used alternative method for obtaining complex profiles of materials with high hardness is the method of electrical-discharge machining. However, the question of predicting the quality of the surface obtained by this method has not been fully studied. The paper considers an empirical model obtained by the method of factor experiment, which allows to predict the roughness of the treated surface. The technique of experimental research is described, the equipment used is shown. Variable regression analysis parameters (I , T_{on} , U) are presented, a planning matrix is compiled, regression coefficients are calculated, significant coefficients are determined, and an empirical model is obtained that has been tested for adequacy. The inverse replacement of matrix parameters was carried out, the final model was obtained. The images of the hypersurface of the response function in the coordinate space with constant parameters (I , T_{on} , U) are shown. The nature of the change in the response function Ra with changing parameters is determined. The roughness limit values are revealed. An empirical model was obtained, which allows predicting the quality of the surface obtained by the method of KEEDM, depending on the processing parameters.

Keywords: electrical-discharge machining, roughness, cutting conditions, copying broaching machine, factor analysis, response function, empirical model, electrode tool, titanium alloy, surface quality.

Введение

Для повышения конструкционных и эксплуатационных характеристик изделий авиационной промышленности, ракетостроения и других наукоемких отраслей требуется использование материалов, обладающих высокими физико-механическими свойствами. Широкое применение находят титановые сплавы, что обусловлено их малой плотностью в сочетании с высокой прочностью и сопротивляемостью [1–5].

Постоянное совершенствование изделий требует новых конструкторских решений. Таким образом, происходит усложнение геометрической формы изделий, появляются сложнопрофильные поверхности.

Сплавы на основе титана имеют высокую прочность, высокое отношение предела текучести к пределу прочности, низкую теплопроводность. Обладая высокими механическими характеристиками, сплавы титана трудно поддаются механической обработке лезвийным инструментом. Низкую обрабатываемость резанием, кроме высокой прочности, обуславливает ряд специфических особенностей процесса резания титановых сплавов.

Большинство титановых сплавов являются сложнолегированными. Леггирующие элементы, обладая высокой энергией связи атомов, повышают предел прочности [6].

В источнике [7] показано, что одним из важных физических свойств титана и сплавов на его основе является их низкий по сравнению со сталями и никелевыми сплавами модуль упругости. При одинаковых размерах и форме упругие деформации заготовок из титановых сплавов в среднем в 2 раза больше, чем заготовок из конструкционных сталей. Это способствует увеличению амплитуды колебаний при резании, снижению точности и качества обрабатываемой поверхности [8].

На основании литературного анализа [9] установлено, что процесс резания титановых сплавов характеризуется высокими значениями температуры в зоне обработки благодаря их высокой прочности и низкой теплопроводности. Температура резания сосредотачивается в зоне стружкообразования, вызывая тем самым структурные превращения и интенсивное взаимодействие с кислородом, азотом, углеродом и водородом внешней среды. В результате такого взаимодействия образуются твердые растворы внедрения не только на поверхности, но и в кристаллической решетке, что резко снижает пластичность титановых сплавов и повышает их твердость.

В то же время лезвийная обработка титановых сплавов сопровождается повышенным износом режущего инструмента. Повышенная интен-

сивность износа режущего инструмента при обработке титановых сплавов определяется двумя факторами: повышенной истирающей способностью титановых сплавов и высокой температурой граничных слоев [10].

Таким образом, сложный профиль современных изделий и повышенные физико-механические свойства титановых сплавов ограничивают применение лезвийного инструмента при их обработке.

Одним из альтернативных методов получения сложнопрофильных деталей из титановых сплавов является метод электроэрозионной обработки (ЭЭО). Данный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с лезвийной обработкой [11–13].

Современное оборудование для ЭЭО позволяет изготавливать детали сложной формы с высокой точностью и качеством обрабатываемой поверхности при минимальной подготовке производства. Помимо этого серьезным преимуществом перед механической обработкой является возможность обработки материала вне зависимости от его твердости и других физико-механических свойств [14].

В настоящее время метод ЭЭО широко применяется при изготовлении изделий из титановых сплавов. В аэрокосмической отрасли и ракетостроении существуют конструкционные элементы деталей, а также отдельные изделия, обработать которые возможно только данным методом [15].

При ЭЭО титановых сплавов практически не возникают силы резания, поэтому появляется возможность обрабатывать малогабаритные и тонкостенные детали без затрат на режущий инструмент [16].

Титановые сплавы имеют низкую теплопроводность. Тепло, выделяемое в процессе обработки, не распространяется по детали, а концентрируется в обрабатываемой области и формирует неравномерный сьем материала. Это объясняет низкое качество поверхности, полученной методом ЭЭО [17–20].

Несмотря на широкое применение метода ЭЭО титановых сплавов, не полностью изучен вопрос прогнозирования качества поверхности, полученной данным методом. Исходя из этого актуальной задачей является получение эмпирической модели, позволяющей прогнозировать показатели шероховатости обработанной поверхности, что позволит подбирать режимы обработки в зависимости от требуемого качества поверхности [20–24].

Цель работы: повышение качества поверхности изделий из титановых сплавов, обработанных методом копировально-прошивной ЭЭО (КПЭЭО) путем подбора рациональных параметров обработки с помощью математической модели, полученной методом факторного эксперимента.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования был проведен полный факторный эксперимент. Обработка результатов эксперимента и получение эмпирической формулы проводились при помощи регрессионного анализа.

В качестве экспериментального оборудования выбран копировально-прошивной станок Smart CNC. В качестве материала ЭИ – медь марки М1 ГОСТ 1173–2006. В качестве рабочей жидкости использовалось трансформаторное масло ГОСТ 982–80. В качестве исследуемого материала выбрана заготовка из титанового сплава ОТ-4 ГОСТ 19807–91.

Измерение шероховатости производилось на профилометре Mahr Perthometer S2 по ГОСТ 2789–73.

Варьируемыми параметрами для проведения регрессионного анализа являются сила тока (I), напряжение (U) и время действия импульса ($T_{он}$).

Таблица варьирования параметров матрицы планирования приведена ниже (табл. 1).

Таблица 1

Интервалы варьирования

Параметр	Нижний уровень	Верхний уровень	Средний уровень	Нижнее «звездное» плечо	Верхнее «звездное» плечо
I, A	2	8	5	1	9
$T_{он}, мкс$	40	150	100	30	200
U, B	50	100	75	45	105

Зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид

$$N = 2^k + 2k + 1 = 15,$$

где N – число опытов; k – число факторов.

Для сведения к минимуму влияния случайных параметров процесса электроэрозионной обработки предусмотрено проведение трех параллельных опытов ($y = 3$). В табл. 2 представлены исходные данные для построения матрицы планирования эксперимента.

Таблица 2

Исходные параметры для матрицы

№ п/п	$X_1 (I, A)$	$X_2 (T_{он}, мкс)$	$X_3 (U, B)$
1	2	40	50
2	8	40	50
3	2	150	50
4	8	150	50
5	2	40	100
6	8	40	100
7	2	150	100
8	8	150	100
9	1	100	75
10	9	100	75
11	5	30	75
12	5	200	75
13	5	100	45
14	5	100	105
15	5	100	75

Составляется матрица планирования с учетом кодирования факторов при значении «звездного» плеча $\alpha = 1,215$ (табл. 3). Значения фиктивных переменных рассчитываются по следующей формуле:

$$X'_p = X_p^2 - \frac{2^n + 2\alpha^2}{N},$$

где p – номер фактора.

Таблица 3

Матрица ОКЦП

№ п/п	X_0	$X_1 (I, A)$	$X_2 (T_{он}, мкс)$	$X_3 (T_{ау}, мкс)$	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 (табл. 4) находится среднее арифметическое значение параметра оптимизации:

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

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

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

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

Ошибка опыта рассчитывается по следующей формуле:

$$\sqrt{S_j^2} = S_j.$$

Проверка однородности дисперсии проводится по критерию Кохрена (уровень значимости $\alpha = 0,05$). Дисперсия является однородной в том случае, если расчетное значение критерия будет меньше табличного значения:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{j\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_j^2} < G_{\text{табл}};$$

$$G_{\text{расч}} = 0,1863 < G_{\text{табл}} = 3,680.$$

Рассчитывается дисперсия воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N} = 0,432\,888\,89. \quad (1)$$

По результатам эксперимента вычисляются коэффициенты модели. Свободный член считается по формуле

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N}.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляются по следующей зависимости:

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

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

В связи с введением фиктивных переменных необходимо уточнить коэффициент b'_0 :

$$b'_0 = b_0 - a^2 \sum_{j=1}^p x_{pj} = 4,3307.$$

Определяются дисперсии коэффициентов регрессии (табл. 5):

$$S(b_0)^2 = S(b'_0)^2 - a^2 S\left(\sum_{j=1}^p x_{pj}\right);$$

$$S^2(b_i) = \frac{S_y^2}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2}.$$

Таблица 4

Результаты эксперимента

№ п/п	Результаты повторов			Среднее \bar{y}_j	Выборочная дисперсия S_j^2	Ошибка S_j
	y_1	y_2	y_3			
1	2,6	3,2	2	2,6000	0,360000	0,60000
2	5,3	4,2	3,1	4,2000	1,210000	1,10000
3	3,1	2,3	2,7	2,7000	0,160000	0,40000
4	3,9	3,2	2,5	3,2000	0,490000	0,70000
5	1,5	2,1	0,9	1,5000	0,360000	0,60000
6	4,8	5,5	6,2	5,5000	0,490000	0,70000
7	4,2	3	3,6	3,6000	0,360000	0,60000
8	6,8	6,3	5,8	6,3000	0,250000	0,50000
9	2,2	1,3	3	2,1667	0,723333	0,85049
10	5,6	6,3	7	6,3000	0,490000	0,70000
11	5,2	4,2	4,7	4,7000	0,250000	0,50000
12	5,8	5,2	4,6	5,2000	0,360000	0,60000
13	4,1	3,6	4,6	4,1000	0,250000	0,50000
14	2,9	3,4	3,9	3,4000	0,250000	0,50000
15	4,6	3,2	3,9	3,9000	0,490000	0,70000

Таблица 5

Коэффициенты полинома

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента	Дисперсия	Значение критерия Стьюдента
b_0	3,95	0,19	9,14
b_1	1,26	0,04	6,35
b_2	0,23	0,04	1,20
b_3	0,31	0,04	1,54
b_{12}	-0,30	0,05	-1,29
b_{13}	0,58	0,05	2,47
b_{23}	0,48	0,05	2,04
b_{11}	-0,29	0,10	-0,91
b_{22}	0,20	0,10	0,63
b_{33}	-0,61	0,10	-1,95

Оценка значимости коэффициентов производится по критерию Стьюдента:

$$f = (k - 1)N = 30,$$

где f – число степеней свободы.

Коэффициент является значимым в том случае, если значение удовлетворяет условию $t_{расч} > t_{табл}$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, с которым определялась ранее дисперсия S_y^2 по формуле (1).

$$t_{расч} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2(b_i)}} > t_{табл}.$$

Рассчитанные значения коэффициентов Стьюдента и значения дисперсий воспроизводимости заносятся в табл. 5.

При уровне значимости $\alpha = 0,73$ предельное значение критерия Стьюдента составляет $t_{табл} = 2,04$. Незначимые коэффициенты регрессии $b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ отбрасываются, и в итоге получается уточненная эмпирическая модель:

$$y = 4,3307 + 1,2620X_1 + 0,5750X_1X_3 + 0,4750X_2X_3.$$

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяется дисперсия адекватности:

$$S_{адекв}^2 = \frac{k \sum_{i=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f_{адекв}} = 3,8937,$$

$$f_{адекв} = N - l = 7,$$

$$F_{расч} = 2,2260 < F_{табл} = 2,3. \quad (2)$$

Исходя из условия (2) можно сделать вывод о том, что модель является адекватной [25].

Проводится обратная замена параметров матрицы планирования для перехода к математической модели. Окончательная модель принимает следующий вид:

$$Ra = 7,3774 - 0,1543I - 0,0686U - 0,0228T_{он} + 0,0077IU + 0,0003UT_{он}.$$

Полученная математическая модель шероховатости является функцией отклика трех переменных – силы тока I (А), времени включения импульса $T_{он}$ (мкс) и напряжения U (В).

Рассекаем четырехмерное пространство трехмерными пространствами, проецируя на него функцию отклика при $I = 3$ А, $U = 100$ В, $T_{он} = 150$ мкс (рис. 1–3).

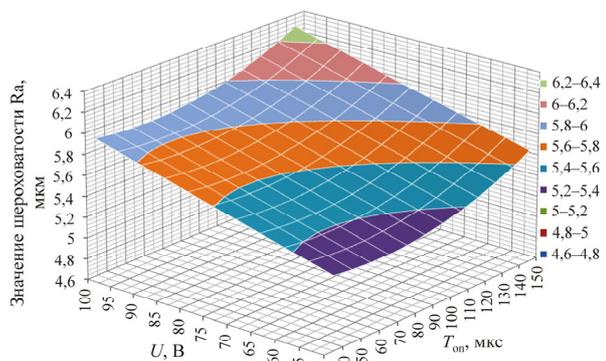


Рис. 1. Гиперповерхность функции отклика при $I = 3$ А

Из рис. 1 следует, что при изменении значения напряжения U значение функции отклика Ra меняется по линейной зависимости. При изменении длительности импульса $T_{он}$ значение величины шероховатости Ra изменяется по квадратичной зависимости.

На рис. 1 показано, что максимальное значение шероховатости $Ra_{max} = 6,286\ 24$ мкм достигается при $U = 100$ В, $T_{он} = 150$ мкс; минимальное значение шероховатости $Ra_{min} = 5,267\ 67$ мкм достигается при $U = 50$ В, $T_{он} = 60$ мкс.

Из рис. 2 следует, что при изменении значения напряжения U значение функции отклика Ra меняется по линейной зависимости. При изменении силы тока I значение величины шероховатости Ra изменяется по квадратичной зависимости.

Максимальное значение шероховатости $Ra_{max} = 6,416\ 93$ мкм при постоянном времени действия импульса $T_{он} = 150$ мкс достигается при $U = 100$ В, $I = 11$ А; минимальное значение полинома $Ra_{min} = 3,023\ 56$ мкм достигается при $U = 50$ В, $I = 21$ А.

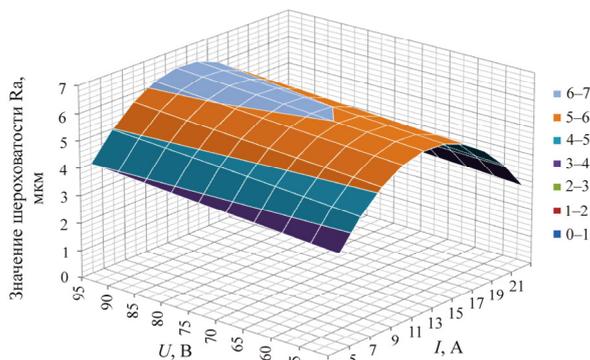


Рис. 2. Гиперповерхность функции отклика при $T_{on} = 150$ мкс

Из рис. 3 следует, что при изменении времени действия импульса T_{on} значение функции отклика Ra меняется по линейной зависимости. При изменении силы тока I значение величины шероховатости Ra изменяется по квадратичной зависимости.

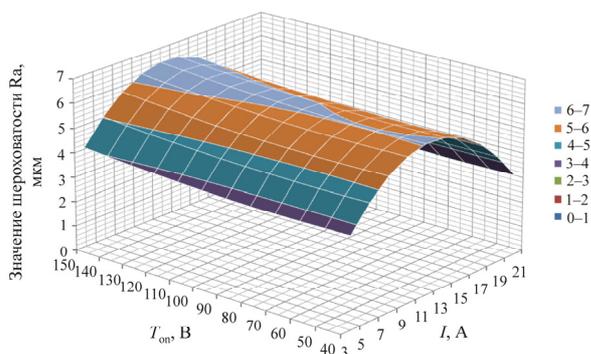


Рис. 3. Гиперповерхность функции отклика при $U = 100$ В

При постоянном напряжении $U = 100$ В максимальное значение шероховатости $Ra_{max} = 6,416\ 93$ мкм достигается при $I = 11$ А, $T_{on} = 150$ мкс; минимальное значение $Ra_{min} = 3,228\ 28$ мкм достигается при $I = 21$ А, $T_{on} = 60$ мкс.

Выводы

1. Получена эмпирическая модель, позволяющая прогнозировать качество поверхности, полученной методом КПЭО, в зависимости от параметров обработки.

2. Показано, что при постоянной силе тока $I = 3$ А максимальное значение шероховатости $Ra_{max} = 6,286\ 24$ мкм достигается при $U = 100$ В, $T_{on} = 150$ мкс; минимальное значение шероховатости $Ra_{min} = 5,267\ 67$ мкм достигается при $U = 50$ В, $T_{on} = 60$ мкс. Максимальное значение шероховатости $Ra_{max} = 6,416\ 93$ мкм при постоянном времени действия импульса $T_{on} = 150$ мкс достигается при $U = 100$ В, $I = 11$ А; минимальное значение поли-

нома $Ra_{min} = 3,023\ 56$ мкм достигается при $U = 50$ В, $I = 21$ А. При постоянном напряжении $U = 100$ В максимальное значение шероховатости $Ra_{max} = 6,416\ 93$ мкм достигается при $I = 11$ А, $T_{on} = 150$ мкс; минимальное значение $Ra_{min} = 3,228\ 28$ мкм достигается при $I = 21$ А, $T_{on} = 60$ мкс.

Список литературы

1. Солнцев Б.П. Материаловедение. – М.: Химиздат, 2007. – 784 с.
2. Журин А.В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2005. – 132 с.
3. Еременко В.Н. Титан и его сплавы. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 499 с.
4. Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М. Обработка резанием коррозионно-стойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. – М.; Л.: Машиностроение, 1964. – 448 с.
5. Резников Н.И., Черемисин А.С. Физические особенности процесса резания, обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышев, 1973. – С. 5–17.
6. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 590 с.
7. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.
8. Machining titanium & its alloys: a technical guide // ASM Int., Materials Park, OH. – 1988. – 44073-0002. – P. 75–85.
9. Research of machinability titanic alloys. Tomorrow's technology // Manuf. Eng. – 2001. – Vol. 127, no. 1. – P. 82–91.
10. Овсенко А.Н., Ташлицкий Н.И. Рациональные методы механической обработки титановых сплавов // Тяжелое машиностроение. – 1990. – № 6. – С. 36–37.
11. Серебrenицкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 228 с.
12. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
13. Сычев Е.А., Тарапанов А.С. Прогнозирование шероховатости поверхности при электроэрозионной обработке деталей сложной конфигурации // Известия Тульского государственного университета: электрон. научн. журн. – 2013. – № 8. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-sherohovost-i-poverhnosti-pri-ektroerozionnoy-obrabotke-detaley-slozhnoy-konfiguratsii> (дата обращения: 12.06.2015).
14. Смоленцев В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. – М.: Высшая школа, 1983. – Т. 1. – 247 с.
15. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.

16. Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 120 с.

17. Сариллов М.Ю., Линева А.С. Электроэрозионная обработка алюминиевых и титановых сплавов: учеб. пособие // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 5 – С. 67–68.

18. Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools // *Int. J. of Modern Eng. Research (IJMER)*. – 2013. – Vol. 3, iss. 3. – P. 1263–1267.

19. Sivakumar K.M., Gandhinathan R. Establishing optimum process parameters for machining titanium alloys (Ti₆Al₄V) in spark electric discharge machining // *Int. J. of Eng. and Adv. Techn.* – 2013. – Vol. 2. – P. 201–204.

20. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototype into direct digital manufacturing. – New York: Springer, 2010. – Vol. 9 – P. 237–258.

21. Justin D., Stucker B. Improving implants using laser-based metal deposition technologies // *BONEZone*. – Spring, 2006. – P. 22–25.

22. Kinoshita N., Fukui M., Kimura Y. Study on wire-EDM: inprocess measurement of mechanical behaviour of electrode-wire // *Ann. CIRP* 33. – 1984. – No. 1. – P. 89–92.

23. Kunieda M., Takeshita S., Okumiya K. Study on wire electrode temperature in WEDM // *Proceed. of Int. Symp. for Electromach.* – ISEM XII. – 1998. – P. 151–161.

24. Scott D., Boyina S., Rajurkar K.P. Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining // *Int. J. Prod. Res.* – 1991. – No. 29(11). – P. 2189–2207.

25. Abraham B., Ledolter J. Statistical methods for forecasting. – New York: Wiley, 1983. – 445 p.

References

1. Solntsev B.P. *Materialovedenie [Material Science]*. Moscow: Khimizdat, 2007. 784 p.

2. Zhurin A.V. *Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke [Calculation methods of technological parameters and electrode-tools at electroerosion machining]*. PhD. theses. Tula, 2005, 132 p.

3. Eremenko V.N. *Titan i ego splavy [titanium and its alloys]*. Kiev: Izdatel'stvo AN USSR, 1955, 499 p.

4. Shifrin A.Sh., Reznitskii L.M. *Obrabotka rezaniem korrozionnostoikikh, zharoprochnykh i titanovykh staley i splavov [Cutting of corrosion-resistant, heat-resistant and titanium steels and alloys]*. Moscow; Leningrad: Mashinostroenie, 1964, 448 p.

5. Reznikov N.I., Cheremisin A.S. *Fizicheskie osobennosti protsessa rezaniia, obrabatyvaemost' zharo-prochnykh i titanovykh splavov [Physical features of the cutting process, machinability of heat-resistant and titanium alloys]*. *Issledovanie obrabatyvaemosti zharoprochnykh i titanovykh splavov*. Kuibyshev, 1973, pp. 5-17.

6. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov [Cutting difficult materials]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1974, 590 p.

7. Krivoukhov V.A., Chubarov A.D. *Obrabotka rezaniem titanovykh splavov [Titanium alloy cutting]*. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 180 p.

8. *Machining titanium & its alloys: a technical guide*. ASM Int., Materials Park, OH, 1988, 44073-0002, pp. 75-85.

9. Research of machinability titanic alloys. Tomorrow's technology. *Manuf. Eng.*, 2001, vol. 127, no. 1, pp. 82-91.

10. Ovseenko A.N., Tashlitskii N.I. *Ratsional'nye metody mekhanicheskoi obrabotki titanovykh splavov [Rational methods of machining titanium alloys]*. *Tiazheloe mashinostroenie*, 1990, no. 6, pp. 36-37.

11. Serebrenitskii P.P. *Sovremennye elektroerozionnye tekhnologii i oborudovanie: ucheb. posobie [Modern erosion technologies and equipment]*. Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Saint-Petersburg, 2007, 228 p.

12. Foteev N.K. *Tekhnologiiia elektroerozionnoi obrabotki [Electrospray technology]*. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 184 p.

13. Sychev E.A., Tarapanov A.S. *Prognozirovaniye sherokhovatosti poverkhnosti pri elektroerozionnoi obrabotke detalei slozhnoi konfiguratsii [Prediction of surface roughness at electroerosion Complex part machining]*. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta: elektronnyi nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 8. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovaniye-sherokhovatosti-poverkhnosti-pri- elektroerozionnoy-obrabotke-detaley-slozhnoy-konfiguratsii> (data obrashcheniia: 12.06.2015).

14. Smolentsev V.P. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical methods of material processing]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1983, vol. 1, 247 p.

15. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozion-naia obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosion machining of aerospace equipment]*. Ed. B.P. Saushkina. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2010, 437 p.

16. Abliaz T.R., Khanov A.M., Khurmatullin O.G. *Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to the technology of electroerosion processing of materials]*. Izdatel'stvo Perm. nats. issled. politekhn. universiteta, 2012, 120 p.

17. Sarilov M.Iu., Lineva A.S. *Elektroerozionnaia obrabotka aliuminievykh i titanovykh splavov [Electroerosion processing of aluminium and titanium alloys]*. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia*, 2013, no. 5, pp. 67-68.

18. Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *Int. J. of Modern Eng. Research (IJMER)*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 1263-1267.

19. Sivakumar K.M., Gandhinathan R. Establishing optimum process parameters for machining titanium alloys (Ti₆Al₄V) in spark electric discharge machining. *Int. J. of Eng. and Adv. Techn.*, 2013, vol. 2, pp. 201-204.

20. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototype into direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010, vol. 9, pp. 237-258.

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

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

23. Kunieda M., Takeshita S., Okumiya K. Study on wire electrode temperature in WEDM. *Proceed. of Int. Symp. for Electromach. ISEM XII*, 1998, pp. 151-161.

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

25. Abraham B., Ledolter J. Statistical methods for forecasting. New York: Wiley, 1983, 445 p.

Получено 16.05.19

Опубликовано 26.09.19

Сведения об авторах

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

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

Осинников Илья Владимирович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследователь-

ского политехнического университета; e-mail: ilyuhaosinnikov@bk.ru.

Хабарова Анастасия Вячеславовна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: umka303@mail.ru.

Омелин Антон Андреевич (Пермь, Россия) – студент кафедры Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: omelin1998@yandex.ru.

About the authors

Evgeny S. Shlykov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Research Engineer, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Kruspert@mail.ru.

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

Ilya V. Osinnikov (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ilyuhaosinnikov@bk.ru.

Anastasia V. Khabarova (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: umka303@mail.ru.

Anton A. Omelin (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ilyuhaosinnikov@bk.ru.