

Абляз Т.Р., Осинников И.В., Шлыков Е.С., Коногорова Л.В., Плотников Е.В. Особенности электроэрозионной обработки корковым электродом-инструментом, полученным по технологии гальванического осаждения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 67–74. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.09

Abliaz T.R., Osinnikov I.V., Shlykov E.S., Konogorova L.V., Plotnikov E.V. Features of electrical discharge machining with a crust electrode-tool obtained by the technology of galvanic deposition. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 67–74. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.09

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 4, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.09

УДК 539.3

**Т.Р. Абляз, И.В. Осинников, Е.С. Шлыков, Л.В. Коногорова, Е.В. Плотников**

Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Россия

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ КОРКОВЫМ  
ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ, ПОЛУЧЕННЫМ ПО ТЕХНОЛОГИИ  
ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ**

Цели исследования: повышение производительности электроэрозионной обработки с применением алюминиевого электрода-инструмента с медным покрытием, создание математической модели методом факторного эксперимента, подбор рациональных параметров обработки. По электроэрозионным свойствам алюминиевые ЭИ с медным покрытием, полученным методом гальванического осаждения, сопоставимы со сплошными ЭИ. Однако вопрос прогнозирования производительности ЭЭО с использованием данных ЭИ изучен не в полной мере. Методом факторного эксперимента создана эмпирическая модель. Благодаря ей становится возможным прогнозирование производительности копировально-прошивной электроэрозионной обработки. Описана методика проведения экспериментальных исследований, показано используемое оборудование. Представлены варьируемые параметры регрессионного анализа ( $I$ ,  $T_{on}$ ,  $U$ ). В процессе теоретического исследования составлена матрица планирования. Вычислены и определены значимые и незначимые коэффициенты регрессии. Произведена проверка на адекватность полученной эмпирической модели. Получена окончательная модель путем обратной замены параметров матрицы. Созданы изображения гиперповерхности функции отклика в координатном пространстве при постоянном значении каждого из параметров регрессионного анализа. Определено влияние изменения параметров на функцию отклика к  $Q$ . Представлены максимальные и минимальные значения производительности. Результатом исследования является эмпирическая модель, позволяющая прогнозировать производительность КПЭЭО с использованием алюминиевого ЭИ с медным покрытием в зависимости от параметров обработки.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, производительность, режимы резания, копировально-прошивочный станок, факторный анализ, функция отклика, эмпирическая модель, гальваническое осаждение, покрытие, качество.

**T.R. Abliaz, I.V. Osinnikov, E.S. Shlykov, L.V. Konogorova, E.V. Plotnikov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**FEATURES OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING  
WITH A CRUST ELECTRODE-TOOL OBTAINED  
BY THE TECHNOLOGY OF GALVANIC DEPOSITION**

A The aim of the study is to increase the productivity of electrical discharge machining using an aluminum electrode-tool EDM with a copper coating by selecting rational processing parameters using a mathematical model obtained by the method of factorial experiment. In terms of electroerosive properties, aluminum ET with a copper coating obtained by the method of galvanic deposition are comparable to continuous EIs. However, the issue of predicting EDM performance using ET data has not been fully studied. The paper considers an empirical model obtained by the method of factorial experiment, which makes it possible to predict the performance of copy-piercing electrical discharge machining. The technique of experimental research is described, the equipment used is shown. The variable parameters of the regression analysis ( $I$ ,  $T_{on}$ ,  $U$ ) are given, the planning matrix is compiled, the regression coefficients are calculated, the significant coefficients are determined, and an empirical model is obtained, tested for adequacy. The reverse replacement of the matrix parameters is carried out, and the final model is obtained. The images of the response function hypersurface in the coordinate space with constant parameters  $I$ ,  $T_{on}$ ,  $U$  are given. The character of the response function  $Q$  changes when the parameters are changed are determined. The limiting values of productivity are revealed. An empirical model has been obtained that makes it possible to predict the performance of KEEDM using an aluminum ET with a copper coating, depending on the processing parameters.

**Keywords:** electrical-discharge machining, performance, cutting conditions, copying broaching machine, factor analysis, response function, empirical model, galvanic deposition, coating, quality.

## Введение

Использование современных материалов с повышенными физико-химическими свойствами в производстве повышает стоимость конечного изделия [1–7]. Необходимо создание нового класса высококачественных изделий, изготавливаемых дешевле и быстрее относительно традиционных методов обработки, таких как резание, литье, прессование и т.д. [8, 9].

По своей природе материалы с повышенными свойствами чаще всего являются труднообрабатываемыми, поэтому обработка таких материалов лезвийным инструментом затруднительна, а лазерная резка и гидроабразивная обработка являются дорогостоящими и не обеспечивают необходимой точности размеров [10, 11]. Технология копирующе-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО) позволяет получать детали сложной формы из материалов с высокими конструкционными и прочностными характеристиками, выполненные из труднообрабатываемых сплавов [12–14]. В настоящее время технология изготовления электродов-инструментов (ЭИ) является дорогостоящей ввиду использования высокого коэффициента используемого материала, уходящего в стружку, соответственно, выходной продукт имеет высокую стоимость производства [15]. Актуальной задачей является внедрение в процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) сложнопрофильного электрода-инструмента с покрытием, позволяющим снизить затраты на его производство [16, 17].

В настоящее время не полностью изучен вопрос прогнозирования производительности КПЭЭО с применением данных ЭИ, поэтому актуальной задачей является получение эмпирической модели, позволяющей прогнозировать показатели производительности, что дает возможность подбирать режимы обработки.

Цель работы – повышение производительности электроэрозионной обработки с применением алюминиевого электрода-инструмента с медным покрытием путем подбора рациональных параметров обработки с помощью математической модели, полученной методом факторного эксперимента.

## Анализ применения электродов-инструментов с покрытием

В качестве электродов-инструментов чаще всего применяют латунь марки Л65 (ГОСТ 17711–93), медь марки М1 (ГОСТ 859–2001) и алюминий марки АЛ1 (ГОСТ 2685–75). Свойства данных материалов представлены в табл. 1 [18, 19].

Медь обладает наибольшими показателями эрозионной стойкости и температуры плавления,

поэтому она находит наибольшее применение в качестве материала ЭИ для КПЭЭО. Однако применение сплошных медных ЭИ экономически неэффективно. Оно характеризуется высокой стоимостью меди, а также низким коэффициентом использования материала.

Таблица 1

Свойства материалов-электродов

Материал электрода	Эрозионная стойкость	Температура плавления, °С
Латунь Л65	0,15	950
Медь М1	7	1085
Алюминий АЛ1	0,11	670

Одним из способов снижения стоимости изготовления ЭИ является получение комплексных ЭИ с эрозионно-стойкими покрытиями (корковые электроды) [20–26]. Для получения основы комплексного ЭИ чаще всего применяются технологии литья и быстрого прототипирования.

По выращенному ЭИ создается восковая модель. Далее по восковой модели создается гипсовая модель, из которой впоследствии выплавляется воск. Таким образом получается форма для литья.

На полученную основу наносится медное покрытие гальваническим способом.

Сила тока 1 А/дм<sup>2</sup>, время погружения ЭИ в ванну 24 ч.

На ЭИ подается минус от установки, на медный электрод, находящийся в растворе, подается плюс. ЭИ полностью погружается в раствор на все время обработки. Через каждый час ЭИ вынимается и раствор тщательно перемешивается.

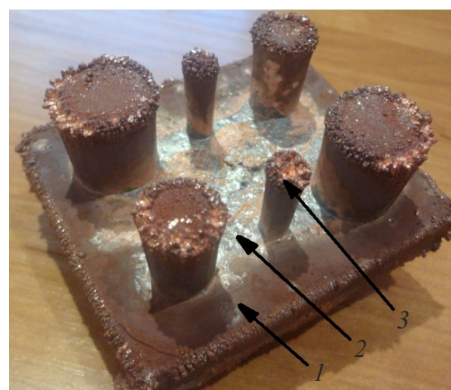


Рис. 1. Корковый ЭИ, полученный методом литья, после гальванической обработки: 1 – слой медного покрытия; 2 – непокрытые участки; 3 – медные наросты

По краям подложки сформирован ровный слой медного покрытия 1 (рис. 1). В ее центре имеются непокрытые места 2 (см. рис. 1). На ребрах имеются наросты меди 3 (см. рис. 1). Данный эффект связан с недостаточной температурой рас-

твора сульфата меди и большой плотностью силы тока при проведении гальванической обработки. Соответственно, для обработки изделий методом КПЭО такой электрод рационально использовать только на черновых режимах.

В работе [27] исследованы металлические электроды с покрытием.

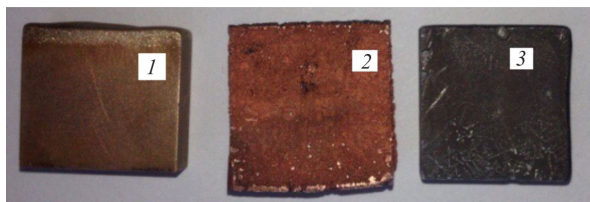


Рис. 2. Электроды-инструменты: 1 – медный ЭИ; 2 – корковый ЭИ; 3 – алюминиевый ЭИ

Электрод № 1 выполнен из меди марки М1 по ГОСТ 1173–2006. ЭИ № 2 выполнен из алюминиевого сплава марки АК12 (ГОСТ 1583–93) с нанесенным медным покрытием. Электрод № 3 выполнен из алюминиевого сплава марки АК12 по ГОСТ 1583–93 (рис. 2).

Нанесение медного покрытия на ЭИ № 2 проводили гальваническим методом в сернокислом электролите при силе тока 1 А/дм<sup>2</sup>. Электролит предварительно подогревался до температуры 60–70 °С. Толщина нанесенного покрытия (рис. 3) составила 1,3 мм.



Рис. 3. Алюминиевый ЭИ с нанесенным медным покрытием: 1 – алюминиевое основание; 2 – медное покрытие

На рис. 4 представлены результаты величины износа электродов-инструментов после обработки стали.

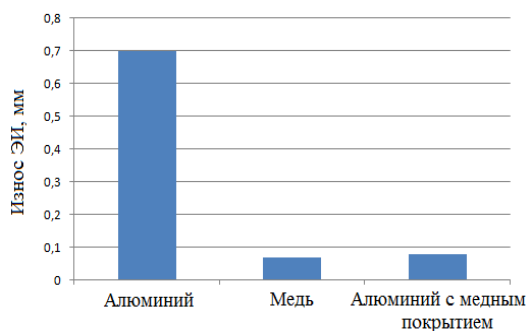


Рис. 4. Износ электродов-инструментов

Показано, что величина износа ЭИ из алюминия (№ 3) наибольшая и составляет 0,7 мм. Величина износа медного ЭИ (№ 1) сопоставима с комплексным ЭИ с нанесенным медным покрытием (№ 2). Величина износа электродов (№ 1 и № 2) не превысила 0,1 мм (табл. 2).

Таблица 2

Значение глубины обработки при ЭО стали 38Х2Н2МА

Электрод-инструмент	Номер опыта	Глубина обработки, мм	Среднее значение производительности обработки, мм/ч
Алюминий	1	0,53	0,52
	2	0,55	
	3	0,48	
Алюминий с медным покрытием	1	0,88	0,89
	2	0,90	
	3	0,89	
Медь	1	0,92	0,92
	2	0,94	
	3	0,90	

На основании полученных данных сделан вывод, что инструмент с покрытием на основе меди допустимо сравнивать со сплошным медным электродом.

### Материалы и методы исследования

Проведен полный факторный эксперимент. При помощи регрессионного анализа проводили обработку результатов эксперимента и получали эмпирические формулы [20, 21].

Экспериментальное оборудование – копировально-прошивной станок Smart CNC.

Рабочая жидкость – трансформаторное масло (ГОСТ 982–80).

Варьируемые параметры для проведения регрессионного анализа: сила тока ( $I$ ), напряжение ( $U$ ) и время действия импульса ( $T_{on}$ ).

Варьирование параметров матрицы планирования представлено в табл. 3.

Таблица 3

Варьирование параметров матрицы планирования

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

Зависимость числа опытов от числа уровней факторов представлена в виде

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

где  $N$  – количество опытов;  $k$  – количество факторов.

Для минимизации влияния случайных процессов в ходе электроэрозионной обработки проведено три параллельных опыта ( $y = 3$ ). Исходные данные для построения матрицы планирования эксперимента представлены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для построения матрицы планирования эксперимента

№ п/п	$X_1$ (I, A)	$X_2$ ( $T_{он}$ , мкс)	$X_3$ (U, В)
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

С учетом кодирования факторов при значении «звездного» плеча  $\alpha = 1,215$  составлена матрица планирования (табл. 5). Значения фиктивных переменных рассчитываются по формуле

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

где  $p$  – номер фактора.

Таблица 5

Матрица ОКЦП

№ п/п	$X_0$	$X_1$ (I, A)	$X_2$ ( $T_{он}$ , мкс)	$X_3$ ( $T_{ав}$ , 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

Найдено среднее арифметическое значение параметра оптимизации для каждой строки матрицы планирования по результатам проведенных экспериментов:

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

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

Чтобы оценить приращение параметра оптимизации от его среднего значения планирования, была вычислена выборочная дисперсия для каждой строки матрицы:

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

Ошибка опыта рассчитана по формуле

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

Результаты эксперимента представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты эксперимента

№ п/п	Результаты повторов			Среднее $\bar{y}_j$	Выбор. дисп. $S_j^2$	Ошибка $S_j$
	$y_1$	$y_2$	$y_3$			
1	0,0305	0,0521	0,0089	0,0305	0,000467	0,02160
2	0,1546	0,0814	0,0082	0,0814	0,005358	0,07320
3	0,0053	0,0685	0,0369	0,0369	0,000999	0,03160
4	0,1957	0,1004	0,0051	0,1004	0,009082	0,09530
5	0,0519	0,0971	0,0067	0,0519	0,002043	0,04520
6	0,0093	0,0725	0,1357	0,0725	0,003994	0,06320
7	0,0083	0,0983	0,0533	0,0533	0,002025	0,04500
8	0,2309	0,1139	0,0069	0,1172	0,012552	0,11204
9	0,0487	0,0073	0,0901	0,0487	0,001714	0,04140
10	0,3849	0,1947	0,0045	0,1947	0,036176	0,19020
11	0,0085	0,1845	0,0965	0,0965	0,007744	0,08800
12	0,3208	0,1646	0,0084	0,1646	0,024398	0,15620
13	0,1394	0,0041	0,2747	0,1394	0,018306	0,13530
14	0,0625	0,3428	0,6231	0,3428	0,078568	0,28030
15	0,0057	0,2757	0,1407	0,1407	0,018225	0,13500

Однородность дисперсии проверяется по критерию Кохрена (уровень значимости  $\alpha = 0,05$ ). Дисперсия однородна, если расчетное значение критерия меньше табличного значения:

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

$$G_{\text{расч}} = 0,3545 < G_{\text{табл}} = 3,680.$$

Рассчитана дисперсия воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_j^2}{N} = 0,00613751. \quad (1)$$

Вычислены коэффициенты модели. Свободный коэффициент рассчитывается следующим образом:

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

Линейные эффекты характеризуются коэффициентами регрессии, которые определяются по 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.

Вследствие введения фиктивных переменных произведено уточнение коэффициента  $b'_0$ :

$$b'_0 = b'_0 - a^2 \sum_{j=1}^p x_{pj} = 0,3544.$$

Определены дисперсии коэффициентов регрессии (см. табл. 5):

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

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

По критерию Стьюдента оценена значимость коэффициентов:

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

где  $f$  – число степеней свободы.

Коэффициент значимый, если полученное значение удовлетворяет условию  $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$  для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, с которым определялась ранее дисперсия  $S_y^2$  (см. формулу (1)):

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

Рассчитанные значения коэффициентов Стьюдента и значения дисперсий воспроизводимости представлены в табл. 7.

При уровне значимости  $\alpha = 0,73$  предельное значение критерия Стьюдента составляет  $t_{\text{табл}} = 2,04$ . Незначимые коэффициенты регрессии  $b_1, b_3, b_{11}, b_{22}$  отброшены, и получена уточненная эмпирическая модель:

$$y = 0,3544 + 0,0141X_2 + 0,0070X_1X_2 - 0,0037X_1X_3 + 0,0026X_2X_3 + 0,0081X_2^2.$$

Таблица 7

Коэффициенты полинома

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента	Дисперсия	Значение критерия Стьюдента
$b_0$	0,1114	0,002 658 91	0,0516
$b_1$	0,0344	0,000 560 38	0,0237
$b_2$	0,0141	0,000 560 38	0,0237
$b_3$	0,0267	0,000 560 38	0,0237
$b_{12}$	0,0070	0,000 767 19	0,0277
$b_{13}$	-0,0037	0,000 767 19	0,0277
$b_{23}$	0,0026	0,000 767 19	0,0277
$b_{11}$	-0,0727	0,001 407 23	0,0375
$b_{22}$	-0,0667	0,001 407 23	0,0375
$b_{33}$	0,0081	0,001 407 23	0,0375

Определена дисперсия адекватности:

$$S_{\text{адекв}}^2 = \frac{k \sum_{i=1}^N (\bar{y}_j - \bar{y}_j)^2}{f_{\text{адекв}}} = 4,22;$$

$$f_{\text{адекв}} = N - l = 7; \tag{2}$$

$$F_{\text{расч}} = 2,2260 < F_{\text{табл}} 2,3.$$

Исходя из условия (2), можно сделать вывод о том, что модель адекватна.

Для преобразования в математическую модель проводится обратная замена параметров матрицы планирования. Окончательная модель имеет следующий вид:

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

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

Произвели рассечение четырехмерного пространства трехмерными, проецируя на него функцию отклика при  $I = 3$  А,  $U = 100$  В,  $T_{\text{он}} = 150$  мкс (рис. 5–7).

Можно сделать вывод, что в зависимости от изменения значения напряжения  $U$  изменение значения функции отклика  $Q$  имеет линейную зависимость. При изменении длительности импульса  $T_{\text{он}}$  изменение значения величины  $Q$  происходит по квадратичной зависимости.

При  $U = 100$  В,  $T_{\text{он}} = 110$  мкс функция отклика  $Q$  принимает максимальное значение производительности  $Q_{\text{max}} = 0,2$  мм/ч; при  $U = 50$  В,  $T_{\text{он}} = 40$  мкс – минимальное значение  $Q_{\text{min}} = 0,06$  мм/ч; сила тока постоянна –  $I = 3$  А.

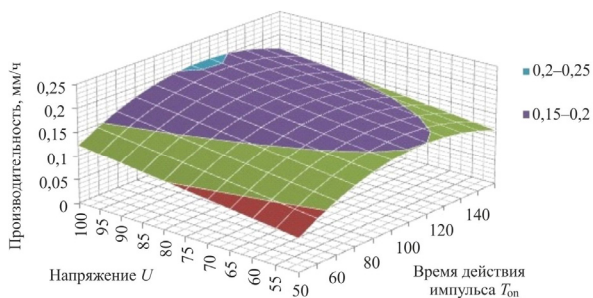


Рис. 5. Гиперповерхность функции отклика,  $I = 3$  А

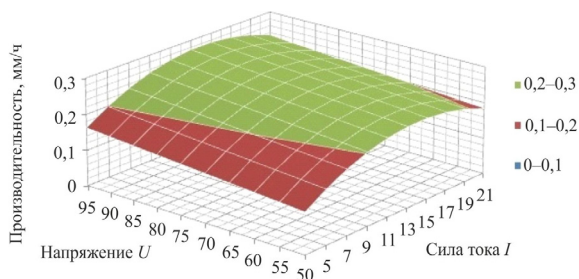


Рис. 6. Гиперповерхность функции отклика,  $T_{on} = 150$  мкс

Исходя из рис. 6, можно сказать, что при изменении напряжения  $U$  изменение значения функции отклика  $Q$  имеет линейную зависимость; при изменении силы тока  $I$  – квадратичную.

При  $U = 100$  В,  $I = 14$  А функция отклика  $Q$  принимает максимальное значение производительности  $Q_{max} = 0,25$  мм; при  $U = 50$  В,  $I = 4$  А – минимальное значение  $Q_{min} = 0,1$  мм; время действия импульса постоянно –  $T_{on} = 150$  мкс.

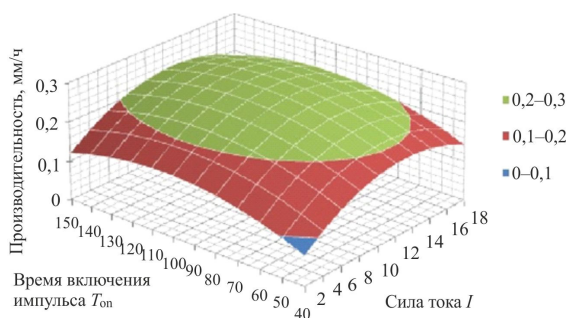


Рис. 7. Гиперповерхность функции отклика при  $U = 100$  В

При изменении значения силы тока  $I$  и длительности импульса  $T_{on}$  изменение значения функции отклика  $Q$  имеет квадратичную зависимость.

При  $I = 8$  А,  $T_{on} = 150$  мкс функция отклика  $Q$  принимает максимальное значение производительности  $Q_{max} = 0,25$  мм; при  $I = 3$  А,  $T_{on} = 40$  мкс – минимальное значение  $Q_{min} = 0,06$  мм; напряжение постоянно –  $U = 100$  В.

При постоянном напряжении  $U = 100$  В максимальное значение производительности  $Q_{max} =$

$= 0,25$  мм достигается при  $I = 8$  А,  $T_{on} = 150$  мкс; минимальное значение  $Q_{min} = 0,06$  мм достигается при  $I = 3$  А,  $T_{on} = 40$  мкс.

Оптимальными параметрами производительности назначены значения силы тока  $I = 2$  А,  $T_{on} = 150$  мкс.

## Выводы

1. Создана эмпирическая модель, благодаря которой становится возможным прогнозирование производительности КПЭЭО с использованием алюминиевого ЭИ с медным покрытием, полученным методом гальванического осаждения.

2. Показано, что при постоянной силе тока  $I = 3$  А максимальное значение производительности  $Q_{max} = 0,2$  мм/ч достигается при  $U = 100$  В,  $T_{on} = 110$  мкс; минимальное значение производительности  $Q_{min} = 0,06$  мм/ч достигается при  $U = 50$  В,  $T_{on} = 40$  мкс. Максимальное значение производительности  $Q_{max} = 0,25$  мм при постоянном времени действия импульса  $T_{on} = 150$  мкс достигается при  $U = 100$  В,  $I = 14$  А; минимальное значение полинома  $Q_{min} = 0,1$  мм достигается при  $U = 50$  В,  $I = 4$  А. При постоянном напряжении  $U = 100$  В максимальное значение производительности  $Q_{max} = 0,25$  мм достигается при  $I = 8$  А,  $T_{on} = 150$  мкс; минимальное значение  $Q_{min} = 0,06$  мм достигается при  $I = 3$  А,  $T_{on} = 40$  мкс.

3. Оптимальными параметрами производительности назначены значения силы тока  $I = 2$  А,  $T_{on} = 150$  мкс.

## Список литературы

1. Солнцев Ю.П., Воложанина С.А., Иголкин А.Ф. *Материаловедение*. – М.: Академия, 2012. – 496 с.
2. *Материаловедение машиностроительного производства: в 2 ч.* / А.М. Адашкин, Ю.Е. Седов, А.К. Онегина, В.Н. Климов. – М.: Юрайт, 2018. – Ч. 1. – 258 с.
3. Дмитренко В.П., Мануйлова Н.Б. *Материаловедение в машиностроении. учеб. пособие*. – М.: Инфра, 2018. – 432 с.
4. Адашкин А.М., Зуев В.М. *Материаловедение (металлообработка)*. – М.: Академия, 2012. – 288 с.
5. *Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях* / В.А. Струк, Л.С. Пинчук, Н.К. Мышкин, В.А. Гольдаде, П.А. Витязь. – М.: Интеллект, 2010. – 536 с.
6. Кузнецов В.А., Черепяхин А.А. *Технологические процессы в машиностроении*. – М.: Академия, 2009. – 192 с.
7. *Технологические процессы машиностроительного производства*. – М.: Форум, 2010. – 528 с.
8. Смоленцев В.П. *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т.* – М.: Высшая школа, 1983. – Т. 1. – 247 с.



9. 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. – 437с.

10. Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М. Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. – М.; Л.: Машиностроение, 1964. – 448 с.

11. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 590 с.

12. 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.

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

14. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

15. Surface morphology and microhardness behavior of 316L in NAr-PMEDM / G. Singh, Y. Lamichhane, A.S. Bhui, S.S. Sidhu, P.S. Bains, P. Mukhiya // *Facta Univ., Series: Mech. Eng.* – 2019. – Vol. 17 (3). – P. 445–454.

16. Аналитика и цена [Электронный ресурс] / Информ. а-во Metal toг. – URL: <https://www.metal-torg.ru/med-tsena-za-gramm.htm> (дата обращения: 20.06.2018).

17. Журин А.В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов в электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2005. – 132 с.

18. Туманов А.Т. Композиционные материалы будущего // *Вестник РАН.* – 1975. – № 3. – С. 37.

19. Катц Н.В. Металлизация тканей. – 2-е изд. – М.: Легкая индустрия, 1972. – 144 с.

20. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

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

22. Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER).* – 2013. – Vol. 3, iss. 3. – P. 1263–1267.

23. Sidhu S.S., Bains P.S. Study of the recast layer of particulate reinforced metal matrix composites machined by EDM // *Materials Today: Proceedings.* – 2017. – No. 4. – P. 3243–3251.

24. Hybrid EDM and grinding hard materials using a metal matrix composite electrode / K.M. Shu, H.R. Shih, W.F. Lin, G.C. Tu // *ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis.* – 2004 – Vol. 3. – P. 247–254.

25. Оглезнев Н.Д. Разработка композиционных материалов электродов-инструментов с улучшенными эксплуатационными характеристиками для обработки металлических сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06. – Красноярск, 2015. – 7 с.

26. Гришарин А.О., Абляз Т.Р., Оглезнев Н.Д. Повышение эффективности электроэрозионной обработки деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения путем применения электродов-инструментов

с повышенными электроэрозионными свойствами // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2017. – Т. 19, № 3. – С. 151–162.

27. Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Кремлев С.С. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38Х2Н2МА // *СТИН.* – 2017. – № 5. – С. 20–21.

## References

1. Solntsev Iu.P., Vologzhanina S.A., Igolkin A.F. *Materialovedenie [Material Science].* Moscow: Akademiia, 2012, 496 p.

2. *Materialovedenie mashinostroitel'nogo proizvodstva [Material science of mechanical engineering production].* Ed. A.M. Adaskin, Iu.E. Sedov, A.K. Onegina, V.N. Klimov. Moscow: Iurait, 2018, 258 p.

3. Dmitrenko V.P., Manuilova N.B. *Materialovedenie v mashinostroeni [Material Science in Mechanical Engineering].* Moscow: Infra, 2018, 432p.

4. Adaskin A.M., Zuev V.M. *Materialovedenie (metalloobrabotka) [Material Science (metalworking)].* Moscow: Akademiia, 2012, 288 p.

5. Struk V.A., Pinchuk L.S., Myshkin N.K., Gol'dade V.A., Vitiaz P.A. *'Materialovedenie v mashinostroenii i promyshlennykh tekhnologiiakh [Material Science in Mechanical Engineering and Industrial Technology].* Moscow: Intellekt, 2010, 536 p.

6. Kuznetsov V.A., Cherepakhin A.A. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii [Technological processes in mechanical engineering].* Moscow: Akademiia, 2009, 192 p.

7. *Tekhnologicheskie protsessy mashinostroitel'nogo proizvodstva [Technological processes of machine-building production].* Moscow: Forum, 2010, 528 p.

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

9. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. *Elektroerozionnaia obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosion processing of aerospace equipment products].* Ed. B.P. Saushkina. Moscow: Izdatelstvo MGТУ imeni N.E. Baumana, 2010, 437p.

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

11. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvae-mykh materialov [Cutting hard-to-machine materials].* Moscow: Vysshiaia shkola, 1974, 590 p.

12. 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].* Perm: Izdatelstvo Perm. nats. issled. politekh. universiteta, 2012, 120 p.

13. Serebrenitskii P.P. *Sovremennye elektro-erozionnye tekhnologii i oborudovanie [Modern electroerosion*

technologies and equipment]. Balt. gos. tekhn. universitet. Saint-Petersburg, 2007, 228 p.

14. Foteev N.K. Tekhnologiya elektroerozionnoi obrabotki [Electroerosion Processing Technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 184 p.

15. Singh G., Lamichhane Y., Bhui A.S., Sidhu S.S., Bains P.S., Mukhiya P., Surface morphology and microhardness behavior of 316l in HAp-PMEDM. Facta University, Series: Mech. Engineering, 2019, no. 17 (3), 445–454

16. Analitika i tsena [Analytics and Price]. Inform. a-vo Metal.torg. URL: <https://www.metal-torg.ru/med-tsenaza-gramm.htm> (available 20 June 2018).

17. Zhurin A.V. Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke [Methods of calculation of technological parameters and electrode tools at electroerosion processing]. PhD theses. Tula, 2005, 132 p.

18. Tumanov A.T. Kompozitsionnye materialy budushchego [Composite materials of the future]. *Vestnik RAN*, 1975, no. 3, p. 37.

19. Katts N.V. Metallizatsiya tkanei [Fabric Metalization]. 2 nd. Moscow: Legkaia industriia, 1972, 144 p.

20. Iu.P. Adler et al. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning of the experiment in search of optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.

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

22. Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 1263–1267.

23. Sidhu S.S., Bains P.S. Study of the recast layer of particulate reinforced metal matrix composites machined by EDM. *Materials Today: Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 3243–3251.

24. Shu K.M., Shih H.R., Lin W.F., Tu G.C. Hybrid EDM and grinding hard materials using a metal matrix composite electrode. *ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2004, vol. 3, pp. 247–254.

25. Ogleznev N.D. Razrabotka kompozitsionnykh materialov elektrodov-instrumentov s uluchshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami dlia obrabotki metallicheskh splavov [Development of composite materials of the electrode-tools with improved performance characteristics for the processing of metal alloys]. PhD theses. Krasnoyarsk, 2015, 7 p.

26. Grisharin A.O., Ablyaz T.R., Ogleznev N.D. Povyshenie effektivnosti elektroerozionnoi obrabotki detalei gidrosilindrov i izdelii spetsial'nogo naznacheniiya putem primeneniia elektrodov-instrumentov s povyshennymi elektroerozionnymi svoystvami [Increase of efficiency of electroerosion processing of details of hydraulic cylinders and products of special purpose by application of electrodes-instruments with the raised electroerosion properties]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 151–162.

27. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Kremlev S.S. Primenenie elektrodov-instrumentov s pokrytiem dlia elektroerozionnoi obrabotki stali 38Kh2N2MA [Application of coated electrodes and tools for electric erosion treatment of 38Cr2Ni2MoA steel]. *STIN*, 2017, no. 5, pp. 20–21.

Получено 03.11.2020

Опубликовано 10.12.2020

### Сведения об авторах

**Абляз Тимур Ризович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Осинников Илья Владимирович** (Пермь, Россия) – студент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: ilyuhaosinnikov@bk.ru.

**Шлыков Евгений Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: Kruspert@mail.ru.

**Коногорова Луиза Викторовна** (Пермь, Россия) – студентка кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: konogorova98@mail.ru.

**Плотников Евгений Владимирович** (Пермь, Россия) – студент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: evgenij.plotnikov.1997@mail.ru.

### About the authors

**Timur R. Ablyaz** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

**Ilya V. Osinnikov** (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: ilyuhaosinnikov@bk.ru.

**Evgeny S. Shlykov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: Kruspert@mail.ru.

**Luiza V. Konogorova** (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: konogorova98@mail.ru.

**Evgeny V. Plotnikov** (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: evgenij.plotnikov.1997@mail.ru.