

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110

В статье предложен метод расчета оптимальных параметров режима проволочно-электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 с использованием ротатбельного центрального композиционного плана второго порядка. Рассмотрено влияние ключевых факторов обработки, таких как время импульса, пауза между импульсами и напряжение межэлектродного зазора, на толщину дефектного слоя и время обработки. Показана возможность использования регрессионных моделей для прогнозирования параметров обработки и оптимизации их значений. Полученные результаты применимы для повышения производительности и качества обработки сложных деталей. Получен диапазон оптимальных параметров: *ON* — от 4,554 мкс до 4,932 мкс, *OFF* — от 8,842 мкс до 11 мкс и *SV* — 50 В.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, планирование эксперимента, циркониевый сплав, параметр, режимы, оптимизация, моделирование.

Введение. В современной медицине активно используются биотехнические изделия, контактирующие с тканями организма и биологическими жидкостями. Одним из основных материалов, применяемых для изготовления и покрытия подобного рода изделий, является циркониевый сплав Э110, который обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Покрытие деталей этим сплавом делает их биосовместимыми, что расширяет возможности применения в медицине. К тому же материал отличается высокой коррозионной стойкостью и механической прочностью [1–3].

При изготовлении деталей из сплава Э110 широко используется метод проволочной электроэрозионной обработки (ПЭЭО). ПЭЭО особенно эффективна для сложных форм, твердых материалов и ситуаций, где традиционные методы оказываются сложными или малоэффективными. Одним из её преимуществ является исключение деформации поверхностей тонкостенных деталей [4].

В обзорных работах авторов [5, 6], с акцентом на параметры, способствующих повышению производительности, представлены актуальные тенденции исследований в области ПЭЭО. Кроме того, в исследовании [7] отмечается важность анализа глубины и фазового состава дефектного слоя. Этот слой формируется из-за переноса материала электрода и продуктов разложения диэлектрической жидкости на поверхность обрабатываемых изделий, что является ключевым критерием качества обработки.

Известны исследования, направленные на поиск оптимальных значений параметров режима ПЭЭО, таких как время паузы между импульсами (*OFF*), напряжение межэлектродного зазора (*SV*), время длительности импульса (*ON*), пиковый ток (*I*) и натяжение проволоки (*WT*) для достижения требуемых параметров качества обрабатываемых деталей [8], однако исследования проводились не на циркониевых сплавах.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Уровень фактора	Факторы		
	A (ON, мкс)	B (OFF, мкм)	C (SV, В)
Основной (0)	4,5	9,25	50
Интервал варьирования	2	1,75	5
Верхний (+1)	6,5	11	55
Нижний (-1)	2,5	7,5	45
В звездных точках:			
+1,68179	8,73	13	62
-1,68179	0,5	5	38

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для РЦКП второго порядка

№ опыта	Кодированные значения факторов			Отклики	
	A	B	C	t, с	h, мкм
1	-1	-1	-1	t ₁	h ₁
2	1	-1	-1	t ₂	h ₂
3	-1	1	-1	t ₃	h ₃
4	1	1	-1	t ₄	h ₄
5	-1	-1	1	t ₅	h ₅
6	1	-1	1	t ₆	h ₆
7	-1	1	1	t ₇	h ₇
8	1	1	1	t ₈	h ₈
9	-1,68179	0	0	t ₉	h ₉
10	1,68179	0	0	t ₁₀	h ₁₀
11	0	-1,68179	0	t ₁₁	h ₁₁
12	0	1,68179	0	t ₁₂	h ₁₂
13	0	0	-1,68179	t ₁₃	h ₁₃
14	0	0	1,68179	t ₁₄	h ₁₄
15	0	0	0	t ₁₅	h ₁₅
16	0	0	0	t ₁₆	h ₁₆
17	0	0	0	t ₁₇	h ₁₇
18	0	0	0	t ₁₈	h ₁₈
19	0	0	0	t ₁₉	h ₁₉
20	0	0	0	t ₂₀	h ₂₀

Свойства материалов, применяемых при электроэрозионной обработке, играют значительную роль. В работе [9] выявлена связь между теплопроводностью материала и его эрозионной стойкостью, что влияет на скорость обработки.

Для оптимизации параметров режима ПЭЭО применяются различные методы дисперсионного анализа — Analysis of variance (ANOVA). Это позволяет улучшить качество деталей, изготовленных из различных материалов, включая сплавы, суперсплавы и композиты, после их обработки методом ПЭЭО [8].

Дисперсионный анализ — это статистический метод, который используется для сравнения сред-

них значений двух или более выборок. Дисперсионный анализ является инструментом, который может использоваться в статистическом анализе для оценки влияния исследуемого фактора на зависимую переменную. Это помогает установить, является ли фактор значимым, и позволяет идентифицировать взаимодействие между переменными.

Помимо дисперсионного анализа инструментом для поиска оптимальных параметров режимов различных технологических процессов используется методология поверхностного анализа — Response surface method (RSM). Метод фокусируется на отношениях между откликом и факторами, которые являются переменными в регрессионной модели. Он помогает определить оптимальные условия для многовариантной системы.

Для проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки особенно важны точность и качество обработки поверхности. Поэтому применение дисперсионного анализа и методологии поверхностного анализа может значительно улучшить подбор оптимальных параметров для ПЭЭО [10].

Цель работы — поиск оптимальных параметров режима ПЭЭО циркониевого сплава Э110 для уменьшения глубины дефектного слоя и повышения производительности обработки.

Материалы и методы исследования. Для определения оптимальных значений технологических параметров режима электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 с целью достижения наименьшей толщины дефектного слоя при наименьшем времени обработки использовался ротатальный центральный композиционный план (РЦКП) второго порядка [11–14].

Ротатальные планы, как и ортогональные, являются композиционными, поскольку позволяют сохранить экспериментальную информацию, полученную с помощью полного факторного эксперимента или дробного факторного эксперимента, которую исследователь далее дополняет опытами в «звездных» точках и в центре плана.

Критерий ротатальности является более сильным критерием оптимальности центрального композиционного плана по сравнению с критерием ортогональности. Ротатальный план позволяет получить модель, способную предсказывать значение функции отклика с одинаковой точностью независимо от направления и на равных расстояниях от центра плана. Поэтому метод РЦКП позволяет получить более точное математическое описание технологического процесса, благодаря увеличению числа опытов в центре плана и специальному выбору величины «звездного» плеча α .

Эффективность и простота факторных экспериментов делают их наиболее часто используемыми для выбора уровней варьирования факторов и одновременного их изменения с целью изучения влияния каждого из факторов на технологический процесс [11–14]. Осуществление РЦКП второго порядка включает в себя двадцать опытов для количества факторов равного трем. Факторы, уровни, интервалы варьирования факторов и матрица планирования РЦКП второго порядка для трех факторов представлены в виде табл. 1 и табл. 2.

В качестве варьируемых факторов были выбраны следующие: время импульса ON, мкс — кодированное значение (A); пауза между импульсами OFF, мкс — кодированное значение (B), межискровой зазор SV, В — кодированное значение (C). Следующие параметры ПЭЭО — скорость промотки

Результаты проведенного промышленного эксперимента

№ опыта	Кодированные значения факторов			Натуральные значения факторов			Отклики	
	A	B	C	ON, мкс	OFF, мкм	SV, В	t, с	h, мкм
1	-1	-1	-1	2,5	7,5	45	304	14
2	1	-1	-1	6,5	7,5	45	180	23
3	-1	1	-1	2,5	11	45	314	13
4	1	1	-1	6,5	11	45	138	22
5	-1	-1	1	2,5	7,5	55	347	14
6	1	-1	1	6,5	7,5	55	172	23
7	-1	1	1	2,5	11	55	407	13
8	1	1	1	6,5	11	55	180	22
9	-1,68179	0	0	0,5	9,25	50	450	10
10	1,68179	0	0	8,73	9,25	50	125	26
11	0	-1,68179	0	4,5	5	50	235	19
12	0	1,68179	0	4,5	13	50	250	18
13	0	0	-1,68179	4,5	9,25	38	206	18
14	0	0	1,68179	4,5	9,25	62	277	17
15	0	0	0	4,5	9,25	50	201	19,5
16	0	0	0	4,5	9,25	50	205	19
17	0	0	0	4,5	9,25	50	195	20,6
18	0	0	0	4,5	9,25	50	192	20
19	0	0	0	4,5	9,25	50	194	20,4
20	0	0	0	4,5	9,25	50	210	19

проводами $WS = 13$ м/мин; давление помпы $WP = 12$ Н; натяжение проволоки $WT = 1,5$ МПа.

Ожидается, что в результате использования РЦКП второго порядка для трехфакторного эксперимента будут получены уравнения регрессии следующего вида:

$$y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{23}BC + b_{11}A^2 + b_{22}B^2 + b_{33}C^2, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ — коэффициенты уравнения регрессии.

Для получения уравнений регрессии и контурных кривых поверхностей равного отклика было использовано приложение DesignExpert13. Для графической интерпретации полученных результатов и поиска оптимальных технологических режимов электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 была использована методология поверхности равного отклика. Методология поверхности равного отклика позволяет определить взаимосвязи между входными факторами процесса и одним или несколькими измеренными откликами. Интерпретация результатов проводилась с использованием модуля дисперсионного анализа (ANOVA).

Проволочно-электроэрозионная обработка.

Для проведения экспериментальных исследований использовался электроэрозионный станок Sodick VZ300L. Скорость обработки измерялась по фактическому времени работы программы, а глубина дефектного слоя определялась с помощью растрового электронного микроскопа.

Были подготовлены образцы, представляющие собой кубы размером $5\text{мм} \times 5\text{мм} \times 5\text{мм}$. Материал

заготовки — циркониевый сплав марки Э110, состоящий из Zr — основа, Nb — 1 %, примесей O, Fe, Hf, Si, Ca, Cr содержание элементов не более 0,25 % (в сумме). Материал электрода-инструмента сплав, включающий в себя Cu — 65 %, Zr — 35 %. Диаметр проволоки 0,2 мм.

ПЭЭО образцов осуществлялась согласно режимам, указанным в табл. 2.

Микроструктурный анализ. После ПЭЭО циркониевых образцов с режимами, приведенными в матрице планирования, были получены микрошлифы, на которых отмечена толщина протравленного дефектного слоя. Травление производилось с помощью не характерного для циркониевых сплавов раствора 30 мл H_2O + 30 мл HNO_3 + 30 мл HCL + 30 мл HF .

Результаты проведения промышленного эксперимента и микроструктурного анализа. Результаты эксперимента приведены в табл. 3 и на рис. 1.

Исследование микрошлифов (рис. 1) позволило выявить, что с увеличением режимов обработки (увеличением параметра ON , уменьшением параметра OFF и увеличением параметра SV) уменьшается время обработки, однако это влечет за собой увеличение толщины дефектного слоя.

В ходе проведения экспериментов было получено, что с увеличением времени длительности импульса уменьшается время обработки, при этом увеличивается и толщина дефектного слоя.

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA). Важной частью любого промышленного эксперимента является оценка вклада каждого из факторов в отдельности на полученные отклики. Ниже рассмотрено влияние времени импульса (ON), паузы между импульсами (OFF) и напряжения межэлектродного зазора (SV) на отклик t и h .

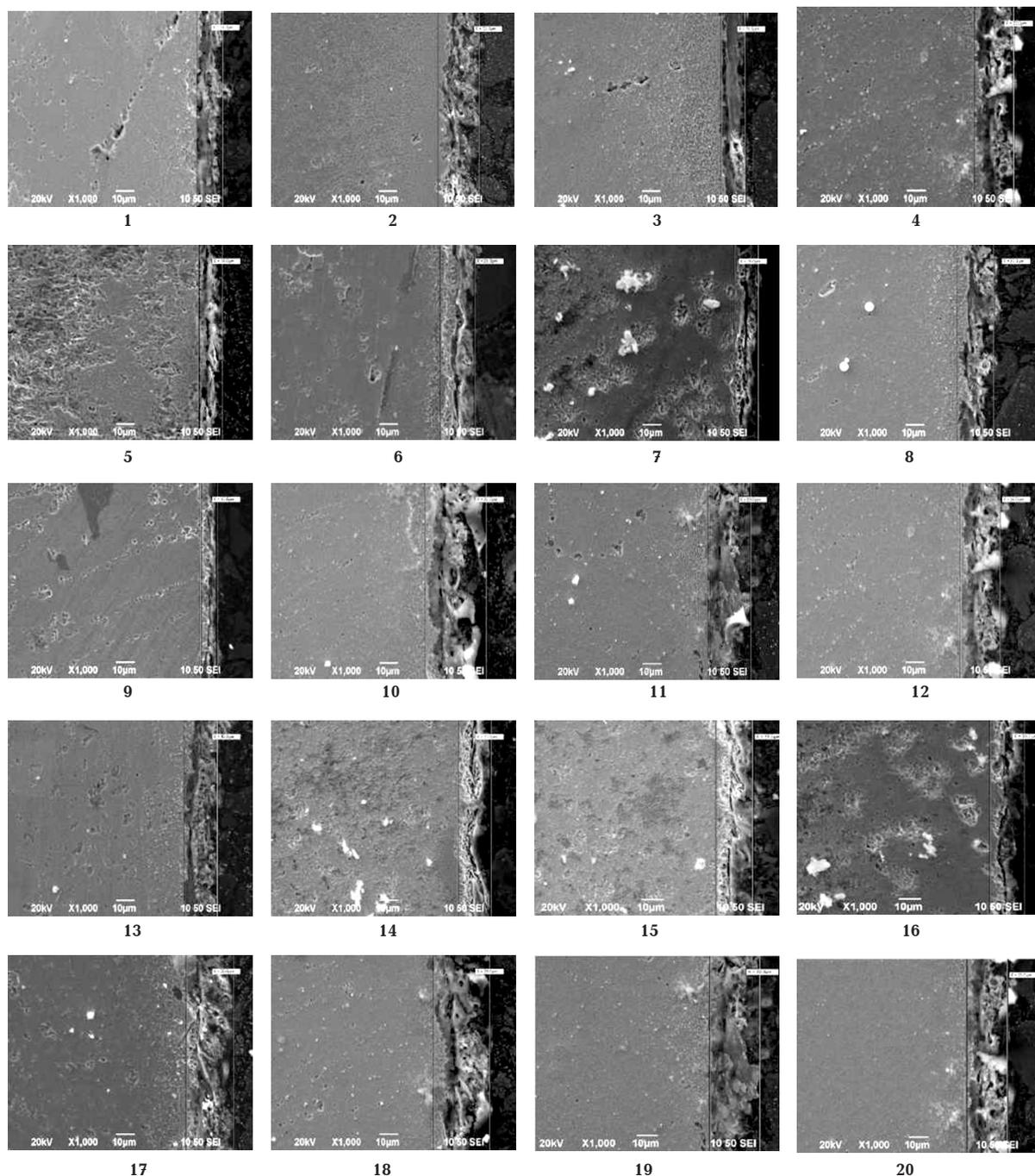


Рис. 1. Протравленные образцы с указанием толщины дефектного слоя после каждого из опытов (номер фотографии соответствует номеру опыта из табл. 3)

вого зазора (SV) на время обработки (t) и толщину дефектного слоя (h).

Чтобы оценить влияние каждого фактора в отдельности, был проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с использованием программного обеспечения для статистического анализа DesignExpert 13. Результаты ANOVA представлены в табл. 4, 5. Для каждого фактора было получено значение F -критерия и p -критерия. По величинам этих значений было сделано заключение о значимости каждого фактора в отдельности. Визуально вклад каждого фактора представлен в виде графиков на рис. 2 и рис. 3.

Анализируя данные в табл. 4 и табл. 5, а также графики на рис. 2 и рис. 3, был сделан вывод, что время обработки и толщина дефектного слоя в значительной степени зависят от времени импульса.

Так, для времени обработки значения F -критерия времени импульса составляют 1889,56 и 214,27 для фактора в первом и втором порядках соответственно, для толщины дефектного слоя значение F -критерия времени импульса составляет 941,27 для фактора в первом порядке. Кроме этого, влияние напряжения межискрового зазора (возможно, что пауза между импульсами оказывает гораздо большее влияние, чем напряжение) на время обработки оценивается как достаточно высокое. Для времени обработки значение F -критерия напряжения межискрового зазора составляет 101,52 для фактора в первом порядке.

Согласно данным, полученным в результате ANOVA, было сделано заключение, что обе регрессионные модели зависимости времени обработки (t) и глубины дефектного слоя (h) от времени импульса

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для времени обработки

Факторы	Сумма квадратов	Среднеквадратичное отклонение (Meansquare)	Значение F-критерия (F-value)	Значение p-критерия (p-value)
A	1,142E+05	1,142E+05	1889,56	< 0,0001
B	274,49	274,49	4,54	0,0589
C	6132,93	6132,93	101,52	< 0,0001
AB	1352,00	1352,00	22,38	0,0008
AC	1300,50	1300,50	21,53	0,0009
BC	1250,00	1250,00	20,69	0,0011
A ²	12944,27	12944,27	214,27	< 0,0001
B ²	2848,93	2848,93	47,16	< 0,0001
C ²	2707,45	2707,45	44,82	< 0,0001

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для глубины дефектного слоя

Факторы	Сумма квадратов	Среднеквадратичное отклонение	Значение F-критерия	Значение p-критерия
A	289,78	289,78	941,27	< 0,0001
B	2,36	2,36	7,68	0,0198
C	0,2071	0,2071	0,6727	0,4312
AB	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
AC	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
BC	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
A ²	5,12	5,12	16,65	0,0022
B ²	2,54	2,54	8,24	0,0167
C ²	8,61	8,61	27,98	0,0004

(ON), паузы между импульсами (OFF) и напряжения межискрового зазора (SV) являются значимыми, поскольку значения *p*-критериев для моделей менее 0,05 и значения среднеквадратичных отклонений *R*² не ниже 0,95 (табл. 6).

После исключения всех незначимых коэффициентов уравнений регрессии со значением *p*-критерия больше 0,05 (табл. 4, табл. 5) окончательный вид уравнений выглядит следующим образом:

$$t = 199,67 - 153,76A + 35,64C - 36,77AB - 36,06AC + 35,36BC + 84,77A^2 + 39,77B^2 + 38,77C^2, \quad (2)$$

$$h = 19,75 + 7,75A - 0,6997B - 1,69A^2 - 1,19B^2 - 2,19C^2. \quad (3)$$

Полученные уравнения регрессии могут быть использованы для назначения технологических параметров режима электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 и прогнозирования влияния этих параметров на время обработки и толщину дефектного слоя.

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным применяются выражения:

$$ON = 4,5 + 2A, \quad (4)$$

$$OFF = 9,25 + 1,75B, \quad (5)$$

$$SV = 50 + 5C. \quad (6)$$

На рис. 4 представлены соотношения между фактическими (actual) и прогнозируемыми (predicted) значениями времени обработки и глубины дефектного слоя.

Для графической интерпретации полученных уравнений регрессии были построены контурные кривые поверхностей равного отклика для времени обработки и глубины дефектного слоя (рис. 5, рис. 6).

Анализируя рис. 5, стоит отметить, что увеличение времени импульса (ON) и увеличение паузы между импульсами (OFF) ведет за собой уменьшение времени обработки (рис. 5а, б, в). Увеличение напряжения искрового (SV) зазора влияет незначительно, однако при одновременном увеличении времени длительности импульса (ON) происходит снижение времени обработки (рис. 5г, д, е). Также, анализируя рис. 6, стоит отметить, что увеличение времени импульса ведет к увеличению толщины дефектного слоя.

Для нахождения оптимальных значений технологических параметров режима электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 были построены совмещенные контурные кривые поверхностей равного отклика (рис. 7). Численные решения представлены в виде табл. 7.

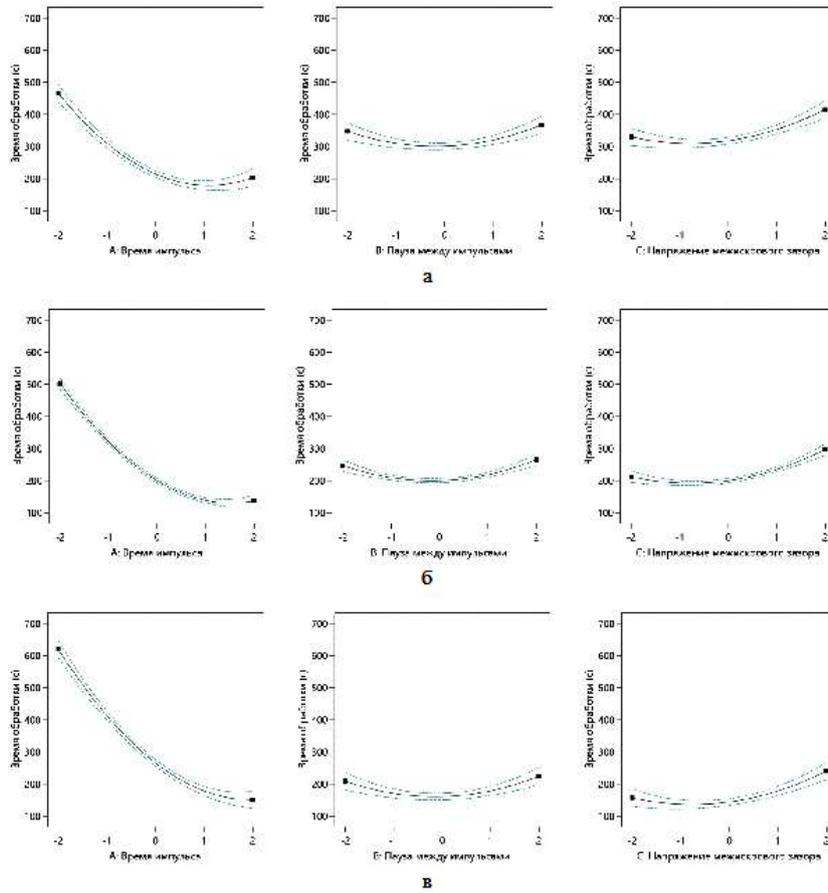


Рис. 2. Вклад каждого фактора для времени обработки:
 а — при кодированных значениях факторов -1; б — при кодированных значениях факторов 0; в — при кодированных значениях факторов +1

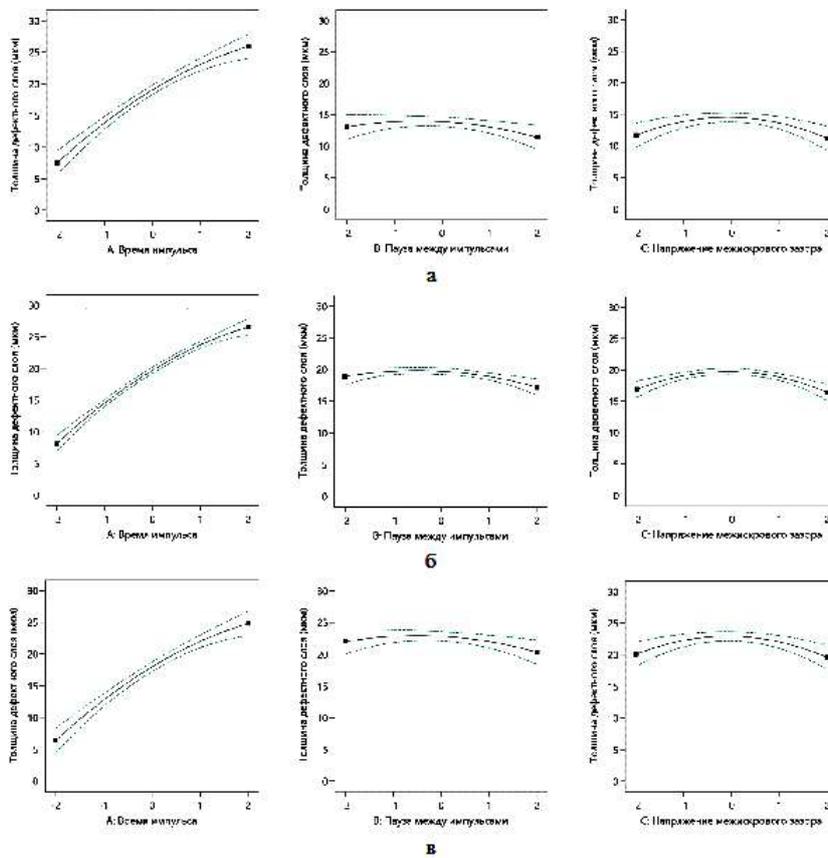


Рис. 3. Вклад каждого фактора для глубины дефектного слоя:
 а — при кодированных значениях факторов -1; б — при кодированных значениях факторов 0; в — при кодированных значениях факторов +1

Результаты оценки значимости полученных уравнений регрессии

Параметр	Отклик	
	Время обработки (t)	Толщина дефектного слоя (h)
Значение p -критерия	< 0,0001	< 0,0001
Значение среднеквадратичного отклонения R^2	0,9957	0,9900
Уточненное значение среднеквадратичного отклонения R^2	0,9919	0,9811
Предсказанное значение среднеквадратичного отклонения R^2	0,9784	0,9721
Аккуратность	55,9529	39,4910

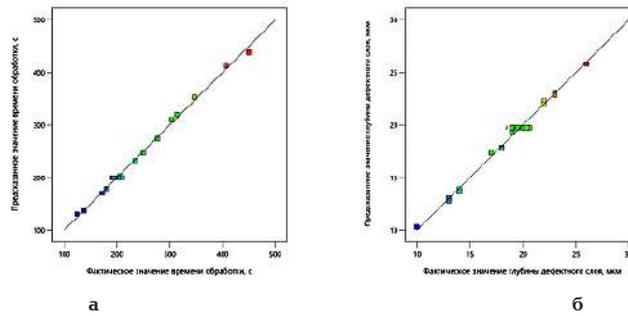


Рис. 4. Диаграммы рассеяния: а — для времени обработки; б — для глубины дефектного слоя

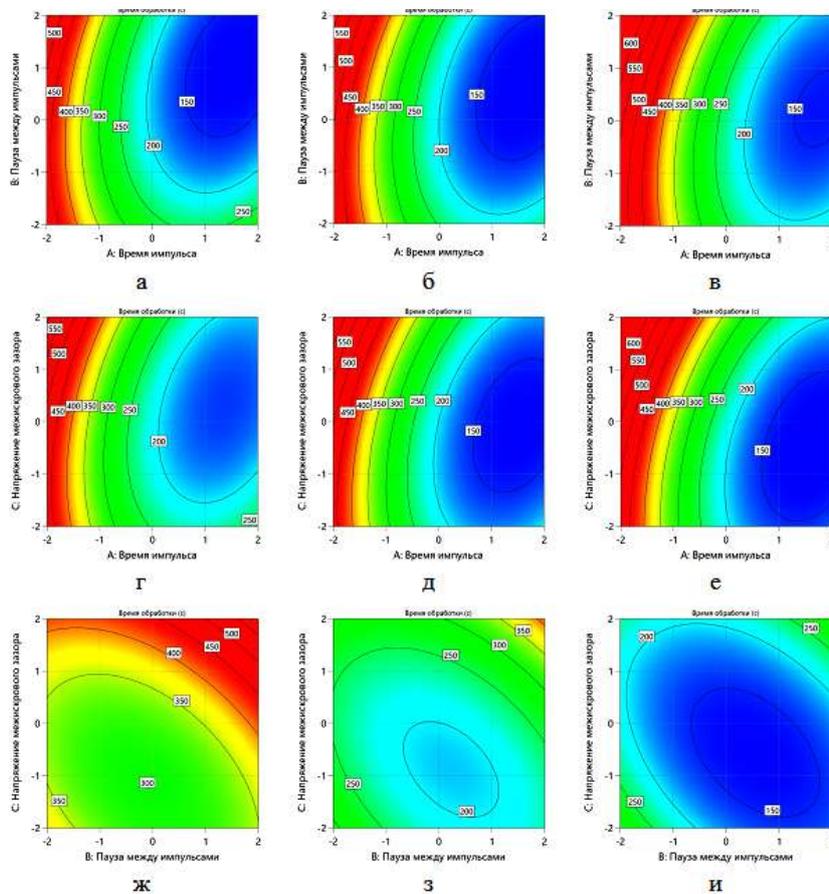


Рис. 5. Контурные кривые поверхностей равного отклика для времени обработки: а — фактор $C = -1$; б — фактор $C = 0$; в — фактор $C = +1$; г — фактор $B = -1$; д — фактор $B = 0$; е — фактор $B = +1$; ж — фактор $A = -1$; з — фактор $A = 0$; и — фактор $A = +1$

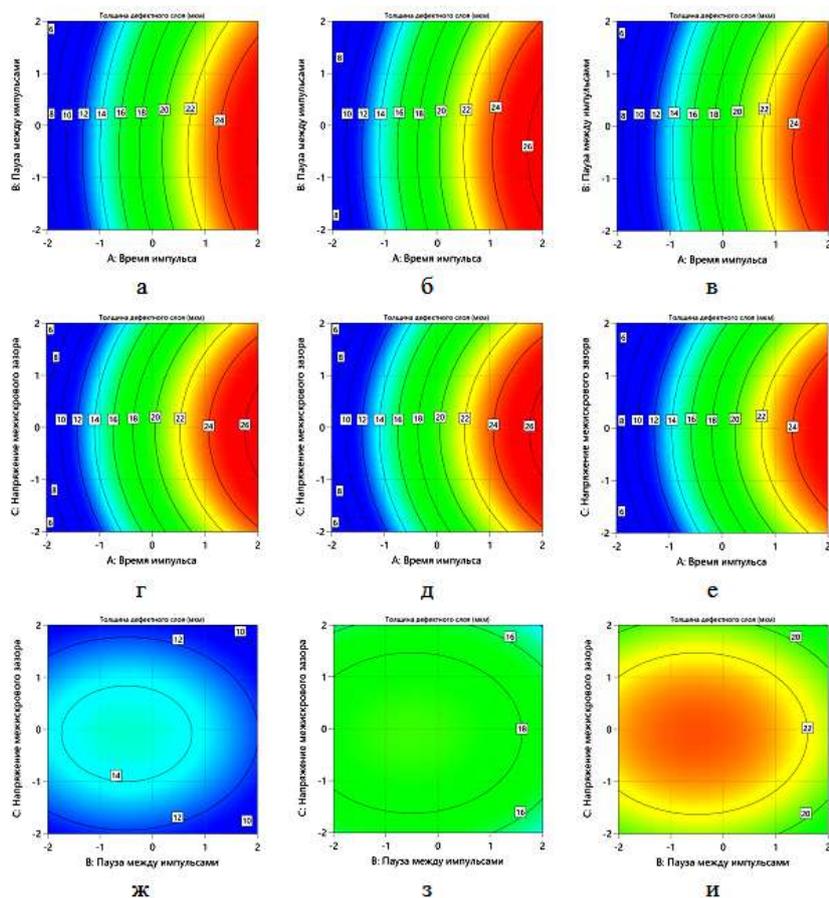


Рис. 6. Контурные кривые поверхностей равного отклика для глубины дефектного слоя: а — фактор $C = -1$; б — фактор $C = 0$; в — фактор $C = +1$; г — фактор $B = -1$; д — фактор $B = 0$; е — фактор $B = +1$; ж — фактор $A = -1$; з — фактор $A = 0$; и — фактор $A = +1$

Анализ уравнения показал, что минимально затрачиваемое на обработку время 196,052 секунд достигается при следующих кодированных значениях факторов: $ON = 0,027$; $OFF = 0,489$; $SV = 0$. В натуральных значениях: время длительности импульса $ON = 4,554$ мкс; пауза между импульсами $OFF = 10,11$ мкс; величина напряжения межискрового зазора $SV = 50$ В, при этом толщина дефектного слоя равна 19,8 мкм.

Эффект от применения оптимальных режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки заключается в сокращении общего времени, затрачиваемого на изготовление катодов для магнетронного распыления.

Наиболее важным критерием поиска оптимума считается толщина дефектного слоя, так как снижение толщины дефектного слоя позволит затрачивать меньше времени на финишную обработку. В результате совмещения двух графиков получен диапазон оптимальных значений параметров: $ON = 4,554 - 4,932$ мкс, $OFF = 8,842 - 11$ мкс, и $SV = 50$ В.

Стоит отметить, что для получения наименьшей толщины дефектного слоя и минимально допустимого времени обработки были рассчитаны параметры $ON = 4,6$ мкс, $OFF = 10$ мкс и $SV = 50$ В. На рис. 8 изображена толщина дефектного слоя (19,2 мкм), полученная на образце, обработанном с оптимальными параметрами. Полученные результаты свидетельствуют о расхождении математической модели с данными, полученными экспериментально, не более чем в 5 %.

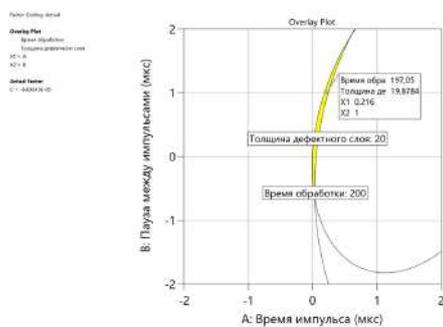


Рис. 7. Совмещенные контурные кривые поверхностей равного отклика

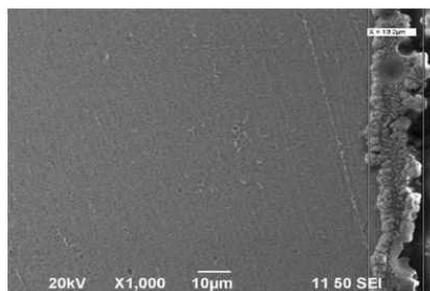


Рис. 8. Протравленный образец с указанием толщины дефектного слоя, обработанный с помощью оптимальных режимов ПЭЭО

Численные решения в области поиска оптимума

Номер решения	Факторы в кодированных значениях			Отклики	
	A	B	C	Время обработки t , с	Толщина дефектного слоя h , мкм
1	0,216	1,000	0,000	197,058	19,878
2	0,209	0,977	0,000	197,006	19,877
3	0,195	0,931	0,000	196,950	19,873
4	0,187	0,903	0,000	196,942	19,869
5	0,180	0,873	0,000	196,777	19,873
6	0,122	0,641	0,000	196,560	19,863
7	0,104	0,601	0,000	197,423	19,819
8	0,129	0,743	0,000	198,227	19,790
9	0,097	0,489	0,000	196,052	19,883
10	0,047	0,112	0,000	196,065	19,910
11	0,034	-0,059	0,000	196,418	19,925
12	0,027	-0,233	0,000	197,007	19,946

Выводы. Было выявлено, что с увеличением режимов обработки (увеличением параметра ON , уменьшением параметра OFF и увеличением параметра SV) уменьшается время обработки, однако это влечет за собой увеличение толщины дефектного слоя. Получен диапазон оптимальных параметров: ON — от 4,554 мкс до 4,932 мкс, OFF — от 8,842 мкс до 11 мкс и SV — 50 В.

Определены оптимальные режимы для проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 латунным электродом-инструментом диаметром 0,2 мм, с помощью сопоставления данных, полученных в ходе сопоставления двух контурных кривых в один график. Для получения наименьшей толщины дефектного слоя и минимально допустимого времени обработки рассчитаны параметры $ON = 4,6$ мкс, $OFF = 11$ мкс и $SV = 50$ В.

После достижения наименьшей толщины дефектного слоя при наиболее высокой в данном случае скорости резания необходимо произвести удаление полученного дефектного слоя наиболее подходящим методом. Малая толщина дефектного слоя позволяет сделать вывод о том, что на финишную операцию будет затрачено немного времени.

Список источников

1. Султанов А. А., Первов Ю. Ю., Яценко А. К. Физико-химические свойства имплантатов и их взаимодействие с окружающими тканями и средами полости рта (обзор литературы) // Вятский медицинский вестник. 2019. № 2 (62). С. 80–86. EDN: WRSCOO.
2. Котенева М. В., Никулин С. А., Рожнов А. Б. Влияние условий окисления на структуру и разрушение оксидных пленок циркониевых сплавов // Прочность неоднородных структур — ПРОСТ 2018: сб. тр. IX Евразийской науч.-практ. конф. 2018. С. 182–182. EDN: XNETRB.
3. Куляшова К. С. Закономерности формирования микродуговых кальций-фосфатных биопокровов на поверхности циркония и их свойства: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2011. 162 с.
4. Попов И. С., Борисенко К. Г. Электроэрозионная обработка как один из перспективнейших методов обработки металла // Юность и Знания — Гарантия Успеха-2018: сб.

науч. тр. 5-й Междунар. молодеж. науч. конф. В 2 т. 2018. С. 259–267. Т. 2. EDN: YNESIP.

5. Siddiqui M. M. U. Z., Iqbal S. A., Zulqarnainet A. [et al.]. An investigative study on the parameters optimization of the electric discharge machining of Ti6Al4V // Clean Technologies and Recycling. 2024. Vol. 4, Issue 1. P. 43–60. DOI: 10.3934/ctr.2024003.

6. Mohanraj T., Thenarasu M., Ragaventhra B. S. [et al.]. Parameter optimization in wire electrical discharge machining using bio-inspired algorithms and response surface methodology // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2024. P. 1–28. DOI: 10.1007/s12008-024-01936-6.

7. Бобков Н. В., Федоров А. А., Полонянкин Д. А. [и др.]. Исследование влияния режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию, шероховатость и трещинообразование поверхности тугоплавких металлов // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 1. С. 148–154. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-148-154. EDN: VLXWHK.

8. Anwar H., Shather S. K., Khudhir W. S. WEDM Process Parameters Analysis and Optimization: A Review // Salud, Ciencia y Tecnología — Serie de Conferencias. 2024. №3. 860. DOI:10.56294/sctconf2024860.

9. Бобков Н. В., Федоров А. А., Бредгауэр Ю. О. [и др.]. Исследование распространения поля температур в глубь циркониевой заготовки при проволоочно-вырезной электроэрозионной обработке // Россия молодая: Передовые технологии — в промышленность. 2023. С. 25–30. DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-25-30. EDN: AIQHLM.

10. Asoo H. R., Alakali J. S., Ikya J. K. [et al.]. Historical background of RSM // Response Surface Methods — Theory, Applications and Optimization Techniques. IntechOpen, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1005302.

11. Ерунова И. Б., Ушаков И. Е. Математические аспекты формирования критериев оптимальности при планировании экспериментов // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2019. Т. 1. С. 131–133. EDN: WCNOTH.

12. Гуштин А. В. Методы планирования эксперимента и выбор групп с линейными характеристиками взаимодействия // Вестник СамГУПС. 2021. № 1(51). С. 97–103. EDN: GAXAXP.

13. Цициашвили Г. Ш., Осипова М. А., Гудименко А. И. Планирование эксперимента для оценки параметров дифференциальных уравнений по неточным наблюдениям // Вест-

ник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 1. С. 28–35. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/1/28-35. EDN: KUSYWC.

14. Giorleo L., Previtali B., Semeraro Q. Modelling of back tempering in laser hardening // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54 (9). P. 969–977. DOI:10.1007/s00170-010-3008-5.

БОБКОВ Николай Владимирович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5351-7755

AuthorID (РИНЦ): 819427

ORCID: 0000-0002-5831-282X

AuthorID (SCOPUS): 57194829384

ResearcherID: S-1503-2016

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4626-9660

AuthorID (РИНЦ): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

ПЕТРОЧЕНКО Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), директор по научным исследованиям и разработкам Научно-исследова-

тельского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО Китайская академия машиностроения, г. Нинбо, Китай

SPIN-код: 3294-1488

AuthorID (РИНЦ): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

АРТЕМЕНКО Никита Сергеевич, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», инженер учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4907-4758

Адрес для переписки: dickydick89@mail.ru

ЧУЛКОВ Роман Васильевич, студент гр. КТО-231 Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Бобков Н. В., Федоров А. А., Петроченко С. В., Артеменко Н. С., Чулков Р. В. Поиск оптимальных значений параметров режима проволочной электроэрозионной обработки деталей из циркониевого сплава Э110 // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 38–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-38-49. EDN: YJFNSI.

Статья поступила в редакцию 11.01.2025 г.

© Н. В. Бобков, А. А. Федоров, С. В. Петроченко,
Н. С. Артеменко, Р. В. Чулков

SEARCH FOR OPTIMAL PARAMETERS OF WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF PARTS MADE FROM E110 ZIRCONIUM ALLOY

The article proposes a method for calculating rational parameters of wire electrical discharge machining of zirconium alloy E110 using a rotatable central composite design of the second order. The influence of key processing factors such as pulse duration, inter-pulse pause, and spark gap voltage on the thickness of the recast layer and machining time is examined. The feasibility of using regression models for predicting processing parameters and optimizing their values is demonstrated. The obtained results are applicable for enhancing the productivity and quality of machining complex parts in medical, aviation, and other industrial sectors.

Keywords: electrical discharge machining, experiment planning, zirconium alloy, parameter, modes, optimisation, modelling.

References

1. Sultanov A. A., Pervov Yu. Yu., Yatsenko A. K. Fiziko-khimicheskiye svoystva implantatov i ikh vzaimodeystviye s okruzhayushchimi tkanyami i sredami polosti rta (obzorliteratury) [Physical and chemical properties of implants, their interaction with surrounding tissues and environments of the oral cavity (literature review)]. *Vyatskiy meditsinskiy vestnik. Medical Newsletter of Vyatka*. 2019. No. 2 (62). P. 80–86. EDN: WRSCOO. (In Russ.).
2. Koteneva M. V., Nikulin S. A., Rozhnov A. B. Vliyaniye usloviy okisleniya na strukturu i razrusheniye oksidnykh plenok tsirkoniyevykh splavov [Influence of oxidation conditions on the structure and degradation of oxide films on zirconium alloys]. *Prochnost' neodnorodnykh struktur—PROST 2018. Strength of Heterogeneous Structures—PROST 2018*. 2018. P. 182–182. EDN: XNETRB. (In Russ.).
3. Kulyashova K. S. Zakonomernosti formirovaniya mikrodogovykh kal'tsiy-fosfatnykh biopokrytiy na poverkhnosti tsirkoniya i ikh svoystva [Regularities in the formation of micro arc calcium phosphate bio coatings on zirconium surface and their properties]. Tomsk, 2011. 162 p. (In Russ.).
4. Popov I. S., Borisenko K. G. Elektroerozionnaya obrabotka kak odin iz perspektivnykh metodov obrabotki metalla [Electrical discharge machining as one of the most promising methods for metal processing]. *Yunost' i Znaniya — Garantiya Uspekha-2018. Youth and Knowledge — Guarantee of Success-2018*. In 2 vols. 2018. Vol. 2. P. 259–267. EDN: YNESIP. (In Russ.).
5. Siddiqui M. M. U. Z., Iqbal S. A., Zulqarnainet A. [et al.]. An investigative study on the parameters optimization of the electric discharge machining of Ti6Al4V. *Clean Technologies and Recycling*. 2024. Vol. 4, Issue 1. P. 43–60. DOI: 10.3934/ctr.2024003. (In Engl.).
6. Mohanraj T., Thenarasu M., Ragaventhra B. S. [et al.]. Parameter optimization in wire electrical discharge machining using bio-inspired algorithms and response surface methodology. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024. P. 1–28. DOI: 10.1007/s12008-024-01936-6. (In Engl.).
7. Bobkov N. V., Fedorov A. A., Polonyankin D. A. [et al.]. Issledovaniye vliyaniya rezhimov provolochno-vyreznoy elektroerozionnoy obrabotki na morfologiyu, sherokhovatost' i treshchinoobrazovaniye poverkhnosti tugoplavkikh metallov [Investigation of the influence of wire electrical discharge machining parameters on morphology, roughness and cracking of surfaces refractory metals]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018. Vol. 6, no. 1. P. 148–154. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-148-154. EDN: VLXWHK. (In Russ.).
8. Anwar H., Shather S. K., Khudhir W. S. WEDM Process Parameters Analysis and Optimization: A Review. *Salud, Ciencia y Tecnología — Serie de Conferencias*. 2024. No. 3. 860. DOI: 10.56294/sctsonf2024860. (In Engl.).
9. Bobkov N. V., Fedorov A. A., Bredgauer Yu. O. [et al.]. Issledovaniye rasprostraneniya polya temperature vglub' tsirkoniyevoy zagotovki pri provolochno-vyreznoy elektroerozionnoy obrabotke [Study of temperature field propagation into zirconium billet during wire-cut EDM]. *Rossiya*

Molodaya: Peredovyye Tekhnologii — v Promyshlennost'. 2023. P. 25–30. DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-25-30. EDN: AIQHLM. (In Russ.).

10. Asoo H. R., Alakali J. S., Ikya J. K. [et al.]. Historical background of RSM // Response Surface Methods—Theory, Applications and Optimization Techniques. IntechOpen, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1005302. (In Engl.).

11. Erunova I. B., Ushakov I. E. Matematicheskiye aspekty formirovaniya kriteriyev optimal'nosti pri planirovani eksperimentov [Mathematical aspects of the formation of optimality criteria in the planning of experiments]. *Sovremennoye obrazovaniye: sodержaniye, tekhnologii, kachestvo. Modern Education: Content, Technologies, Quality*. 2019. Vol. 1. P. 131–133. EDN: WCNOTH. (In Russ.).

12. Gushchin A. V. Metody planirovaniya eksperimenta i vybor grupp s lineynymi kharakteristikami vzaimodeystviya [Methods of experiment planning and selection of groups with linear interaction characteristics]. *Vestnik SamGUPS*. 2021. No. 1(51). P. 97–103. EDN: GAXAXP. (In Russ.).

13. Tsitsiashvili G. Sh., Osipova M. A., Gudimenko A. I. Planirovaniye eksperimenta dlya otsenki parametrov differentsial'nykh uravneniy po netochnym nablyudeniyam [Planning an experiment to estimate the parameters of differential equations based on inaccurate observations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemy analiz i informatsionnyye tekhnologii. Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2024. No. 1. P. 28–35. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/1/28-35. EDN: KUSYWC. (In Russ.).

14. Giorleo L., Previtali B., Semeraro Q. Modelling of back tempering in laser hardening // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 54 (9). P. 969–977. DOI: 10.1007/s00170-010-3008-5. (In Engl.).

BOBKOV Nikolay Vladimirovich, Senior Lecturer of the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5351-7755

AuthorID (RSCI): 819427

ORCID: 0000-0002-5831-282X

AuthorID (SCOPUS): 57194829384

ResearcherID: S-1503-2016

FEDOROV Aleksey Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4626-9660

AuthorID (RSCI): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

PETROCHENKO Sergei Valeryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, R&D Director of Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Industry Institute Group, Ningbo, China.

SPIN-code: 3294-1488

AuthorID (RSCI): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

ARTEMENKO Nikita Sergeevich, Graduate Student of the Metal Cutting Machines and Tools Department, Engineer at the «Modern Manufacturing Technologies» Research and Production Center, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4907-4758

Correspondence address: dickydick89@mail.ru

CHULKOV Roman Vasilyevich, Student at gr. KTO-231 of the Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

For citations

Bobkov N. V., Fedorov A. A., Petrochenko S. V., Artemenko N. S., Chulkov R. V. Search for optimal parameters of wire electrical discharge machining of parts made from E110 zirconium alloy. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 38–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-38-49. EDN: YJFNSI.

Received January 11, 2025.

© N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, S. V. Petrochenko, N. S. Artemenko, R. V. Chulkov