

Том 21
Номер 3

eISSN 2658–5782

2026

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

электронный
научный журнал

MULTIPHASE
SYSTEMS

online
journal

<https://multiphasesystems.online>



Институт
механики
им. Р.Р. Мавлютова



Численное моделирование распределения напряженности электрического поля при электрохимической обработке титановых сплавов

А.А. Соколова✉, Н.М. Шерыхалина, А.Р. Ураков, Е.Р. Шаймарданова

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

E-mail: alexandrakrasich@gmail.com

Аннотация. Рассматривается распределение безразмерного электрического поля в двумерной модели межэлектродного пространства при электрохимической обработке. Поводом для исследования стали наблюдаемые эффекты повреждения боковых поверхностей титановых заготовок за пределами зоны формообразования. Работа направлена на оценку краевых эффектов, а также сопоставление напряжённости в рабочем зазоре и прилегающих областях электролита. Геометрия модели задана без привязки к физическим размерам; геометрическим параметром служит отношение высоты межэлектродного зазора к вертикальному размеру электрода. Электролит рассматривается как неограниченная среда, а разность потенциалов электродов задаётся параметром. Радиусы скругления кромок отдельно не задавались. Проанализированы результаты расчёта, выполненного в программном комплексе ELCUT методом конечных элементов. Результаты представлены в виде безразмерного модуля напряжённости E^* . По экспортированным данным построены координатные профили и карта распределения безразмерной напряжённости. Для боковых областей представлены интерполяционные изолинии, позволяющие проследить пространственное изменение поля. Полученные результаты согласуются с предположением о возможности паразитного растворения вне зоны формообразования. Однако установление причин повреждений требует сопоставления расчётных распределений с состоянием поверхности и электрохимическими характеристиками сплава в используемом электролите. Выявленные особенности поля позволяют наметить варианты изменения конструкции электрода-инструмента и размещения изоляционных экранов. Эффективность таких изменений необходимо оценивать дополнительными расчётами с проверкой сеточной сходимости и экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: электрохимическая обработка; титановые сплавы; метод конечных элементов; напряжённость электрического поля; паразитное растворение; пассивация

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-99-33001.

Цитирование: Соколова АА, Шерыхалина НМ, Ураков АР, Шаймарданова ЕР. Численное моделирование распределения напряженности электрического поля при электрохимической обработке титановых сплавов. *Многофазные системы*. 2026;21(3):123–128.

Numerical Simulation of Electric Field Distribution in Electrochemical Machining of Titanium Alloys

A.A. Sokolova✉, N.M. Sherykhalina, A.R. Urakov, E.R. Shaimardanova

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

E-mail: alexandrakrasich@gmail.com

Abstract. This study examines the dimensionless electric field distribution in a two-dimensional model of the interelectrode region during electrochemical machining (ECM). The investigation was prompted by damage observed on the lateral surfaces of titanium workpieces outside the intended machining zone. The aim is to assess edge effects and compare electric field strengths within the working gap and in adjacent regions of the electrolyte. The model geometry is defined independently of physical dimensions, with the ratio of the interelectrode gap height to the vertical dimension of the electrode serving as a key parameter. The electrolyte is treated as an unbounded medium, and the potential difference between the electrodes is specified as a model parameter. Edge rounding radii are not explicitly prescribed. The analysis is based on finite element simulations performed in ELCUT. The results are presented as the dimensionless electric field magnitude E^* . The exported data are used to construct spatial profiles and a map of the dimensionless field strength distribution. Interpolated contour lines are presented for the lateral regions to illustrate spatial variations in the field. The E^* values vary only slightly across the selected section of the gap. The field is weaker in the lateral regions, where elevated values are concentrated near the gap level and decrease

with distance from it along the directions examined. These findings are consistent with the possibility of stray dissolution outside the intended machining zone. Establishing the causes of the damage, however, requires comparison of the calculated field distributions with the observed surface condition and the electrochemical characteristics of the alloy in the electrolyte used. The identified field patterns suggest possible modifications to the tool electrode geometry and the placement of insulating shields. The effectiveness of these modifications should be assessed through further simulations, including mesh convergence checks, and experimental investigation.

Keywords: electrochemical machining; titanium alloys; finite element method; electric field strength; stray dissolution; passivation

Funding: The investigation is funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-99-33001.

Cite: Sokolova AA, Sherykhalina NM, Urakov AR, Shaimardanova ER. Numerical simulation of electric field distribution in electrochemical machining of titanium alloys. *Multiphase Systems*. 2026;21(3):123–128.

1. Введение

Титановые сплавы применяются при изготовлении деталей газотурбинных двигателей, в том числе лопаток компрессоров. Электрохимическая обработка (ЭХО) позволяет формировать их поверхности за счёт анодного растворения материала. Заготовку подключают к положительному полюсу источника тока, электрод-инструмент — к отрицательному; электролит в межэлектродном зазоре замыкает электрическую цепь. Расчёт формы инструмента и межэлектродного пространства составляет основу математического описания формообразования. Алгоритм профилирования электрода-инструмента при импульсной ЭХО рассмотрен в работе [1], а его связь с построением трёхмерной модели инструмента в CAD-системе в [2].

При обработке титановых сплавов наряду с точностью формы необходимо учитывать состояние поверхностного слоя. В работе [3] исследовано наводораживание сплава ВТ9 при окончательной импульсной ЭХО лопаток компрессора. В экспериментах с комбинированным электродом «железо-титан» установлено, что анодное поведение его составляющих изменяется при изменении состава галогенидсодержащего электролита и режима поляризации [4]. Эти процессы определяют необходимость совместного рассмотрения распределения поля и электрохимических свойств поверхности.

В ходе натурных испытаний наблюдались локальные повреждения боковых поверхностей титановых заготовок вне зоны непосредственного формообразования. Одной из возможных причин является растекание тока за пределы рабочего зазора. В настоящей работе исследуется соответствующее распределение электрического поля в двумерном сечении ячейки. Целью расчёта является сопоставление напряжённости в зазоре и прилегающих боковых областях, а также определение сосредоточения повышенных значений поля.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Формулировка безразмерной двумерной модели электрического поля в межэлектродном пространстве.
2. Расчёт распределения напряжённости методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ELCUT.

3. Сопоставление значений поля в рабочем зазоре и боковых областях по расчётной выборке.
4. Определение направления изменения геометрии инструмента и размещения изоляционных экранов для последующей проверки.

2. Математическая постановка и численный метод

Рассматривается двумерное сечение двух электродов с узким зазором и прилегающими областями электролита. Геометрия задана в безразмерных координатах X, Y . Геометрическим параметром служит отношение высоты зазора d^* к вертикальному размеру электрода H^* :

$$\delta = \frac{d^*}{H^*}.$$

Электролит принимается однородным и неограниченным, поле стационарным, поверхности электродов — эквипотенциальными. Геометрия в ходе расчёта не изменяется; скругление кромок отдельно не задаётся. Влияние температуры, концентрации и течения электролита в данной постановке не рассматривается.

Через Φ обозначим безразмерный потенциал. Вектор напряжённости и его модуль определяются соотношениями

$$E^* = -\nabla\Phi, \quad |E^*| = |\nabla\Phi|, \quad (1)$$

где дифференцирование выполняется по координатам X, Y . В однородной среде потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial Y^2} = 0.$$

Такая постановка описывает первичное распределение тока, при котором падением потенциала на межфазных границах пренебрегают. Учёт электродных реакций требует задания поляризационных зависимостей в граничных условиях; соответствующий подход рассмотрен в [5]. Здесь исследуется влияние геометрии на поле в электролите.

Для численного решения использован программный комплекс ELCUT. Схема поперечного сечения межэлектродного пространства приведена на рис. 1. Модуль E^* далее представлен в исходной нормировке безразмерной задачи; дополнительное деление на поле в рабочем зазоре не выполняется.

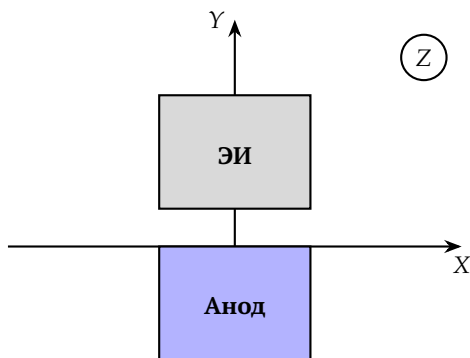


Рис. 1. Схема поперечного сечения межэлектродного пространства; ЭИ – электрод-инструмент

Расчётная область разбивается на треугольные конечные элементы. Внутри каждого элемента потенциал аппроксимируется линейной комбинацией узловых значений:

$$\Phi_h(X, Y) = \sum_{i=1}^3 N_i(X, Y) \Phi_i.$$

Здесь $N_i(X, Y) = a_i + b_i X + c_i Y$ – линейные функции формы. Коэффициенты a_i , b_i и c_i определяются координатами вершин треугольника. После объединения элементов и учёта граничных условий формируется разреженная система линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений Φ_i . По найденному потенциалу напряжённость вычисляется согласно (1). Для линейных треугольных элементов градиент постоянен внутри каждого элемента; при построении изображения

поля следует учитывать способ его интерполяции.

Использовалась треугольная сетка с локальным сгущением около зазора и кромок (рис. 2). После первоначального построения выполнялась перестановка узлов. Выбор МКЭ связан с возможностью локального сгущения сетки и используемым решателем. Применение этого метода к моделированию ЭХО и профилированию инструмента описано в [1].

На поверхностях анода и катода потенциалы задаются с безразмерной разностью U^* , индексы a и c обозначают соответствующие границы:

$$\Phi|_{\Gamma_a} = U^*, \quad \Phi|_{\Gamma_c} = 0.$$

Для неограниченного электролита при отсутствии внешнего поля принимается условие $\Phi \rightarrow \Phi_\infty$ при удалении от электродов, где Φ_∞ – конечная постоянная. Границы окна изображения не являются изолирующими стенками ячейки.

При численном представлении неограниченной среды положение и условия на искусственной внешней границе требуют отдельной проверки. Сравнение решений при её удалении, как и исследование сеточной сходимости, в настоящей работе не выполнялось.

Для анализа использована выборка из 420 точек, содержащая координаты X , Y и модуль E^* . Карта значений поля и изолинии в боковых областях представлены на рис. 3. Изолинии построены линейной интерполяцией только в ячейках с четырьмя положительными вершинами. Нулевые записи показаны отдельно и в интерполяции не участвуют.

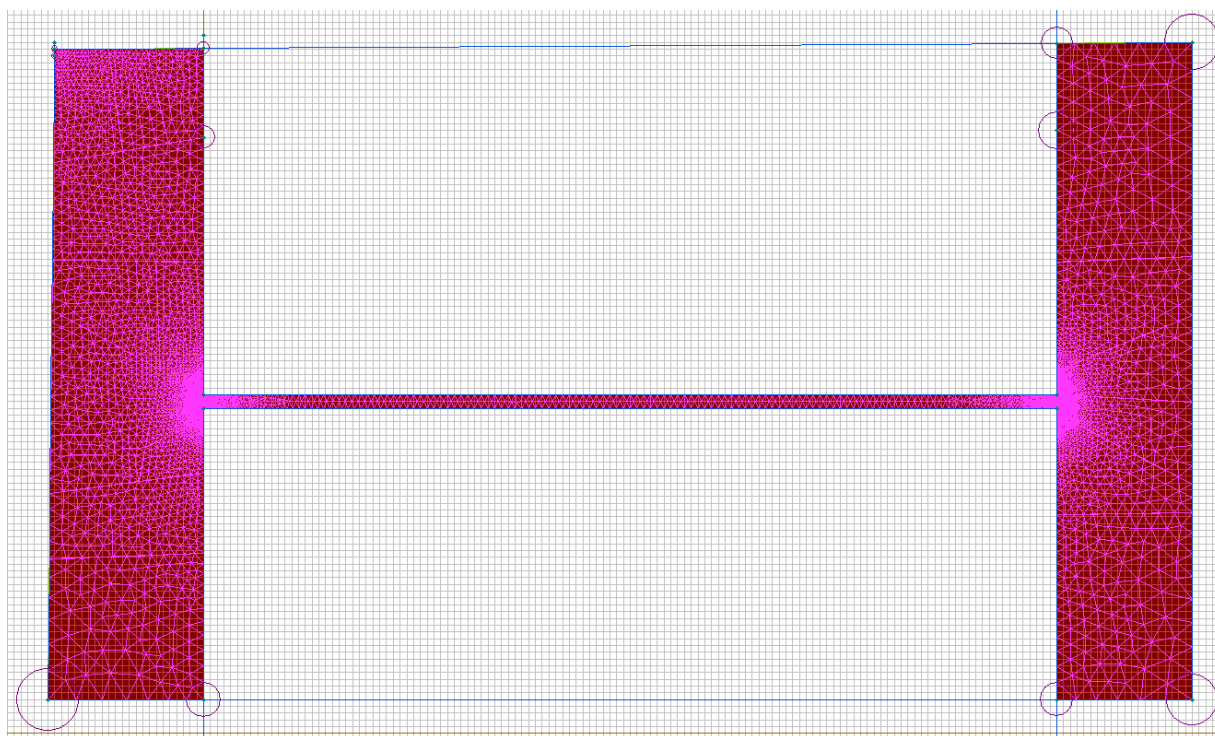


Рис. 2. Конечно-элементная сетка в межэлектродном пространстве

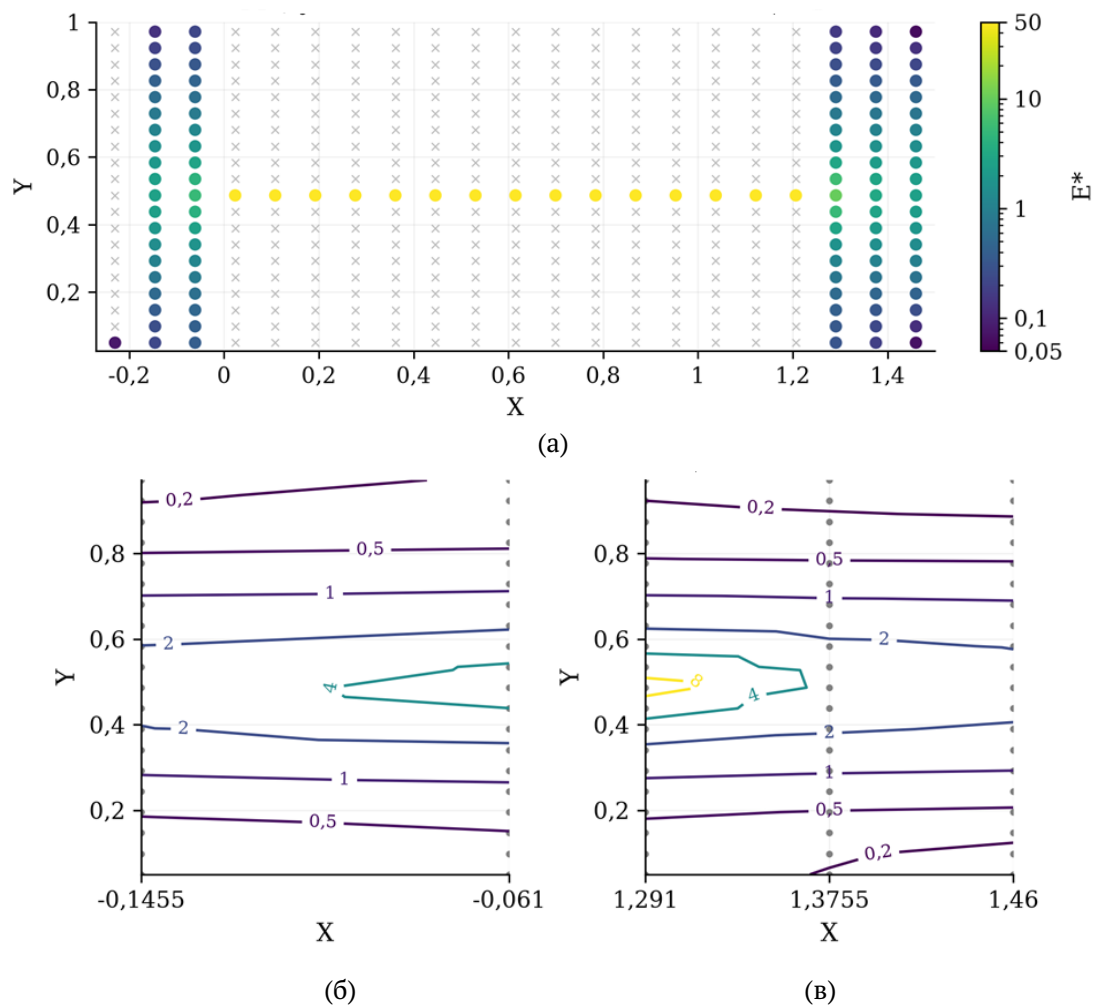


Рис. 3. Безразмерный модуль поля E^* : карта значений (а) (крестиками отмечены нулевые записи); интерполяционные изолинии в левой (б) и правой (в) боковых областях. Цветовая шкала карты логарифмическая

В расчётной выборке содержатся 116 положительных значений и 304 нулевые записи. Для интерпретации нулей необходимо учитывать принадлежность точек электролиту или электродам. Поэтому диапазоны в табл. 1 приведены для положительных отсчётов. В пределах рабочего зазора выборка содержит один ряд точек, что позволяет оценить профиль вдоль него.

3. Анализ результатов

В табл. 1 сопоставлены значения безразмерной напряжённости в рабочем сечении и боковых областях. Профиль вдоль зазора и два профиля в боковых областях приведены на рис. 4. Маркеры на графиках соответствуют исходным точкам, линии между ними служат для наглядного сопоставления.

В рабочем сечении пятнадцать значений E^* лежат в диапазоне 49,9962–50,0000. Размах относительно максимального значения составляет 0,0076 %. В пределах данной выборки поле вдоль зазора практически постоянно.

В левой боковой области наибольшее значение $E^* = 5,31094$ получено в точке $(-0,0610; 0,4865)$, в правой $E^* = 9,92884$ в точке $(1,2910; 0,4865)$. Оба максимума выборки расположены на уровне рабочего зазора. При удалении от этого уровня вверх и вниз напряжённость на рассмотренных боковых линиях уменьшается.

Изменение поля наблюдается и при удалении от зазора по горизонтали. При $Y = 0,4865$ слева E^* уменьшается от 5,31094 при $X = -0,0610$ до 2,59996 при $X = -0,1455$. Справа при $X = 1,3755$ и $X = 1,4600$ получены значения 3,15896 и 2,47978 соответственно. Карта

Таблица 1. Значения безразмерной напряжённости в выделенных областях

Область	Координаты	Число точек	Диапазон E^*
Рабочее сечение	$Y = 0,4865;$ $0,0235 \leq X \leq 1,2065$	15	49,9962–50,0000
Левая боковая область	$X < 0,0235$	41	0,0780761–5,31094
Правая боковая область	$X > 1,2065$	60	0,0607135–9,92884

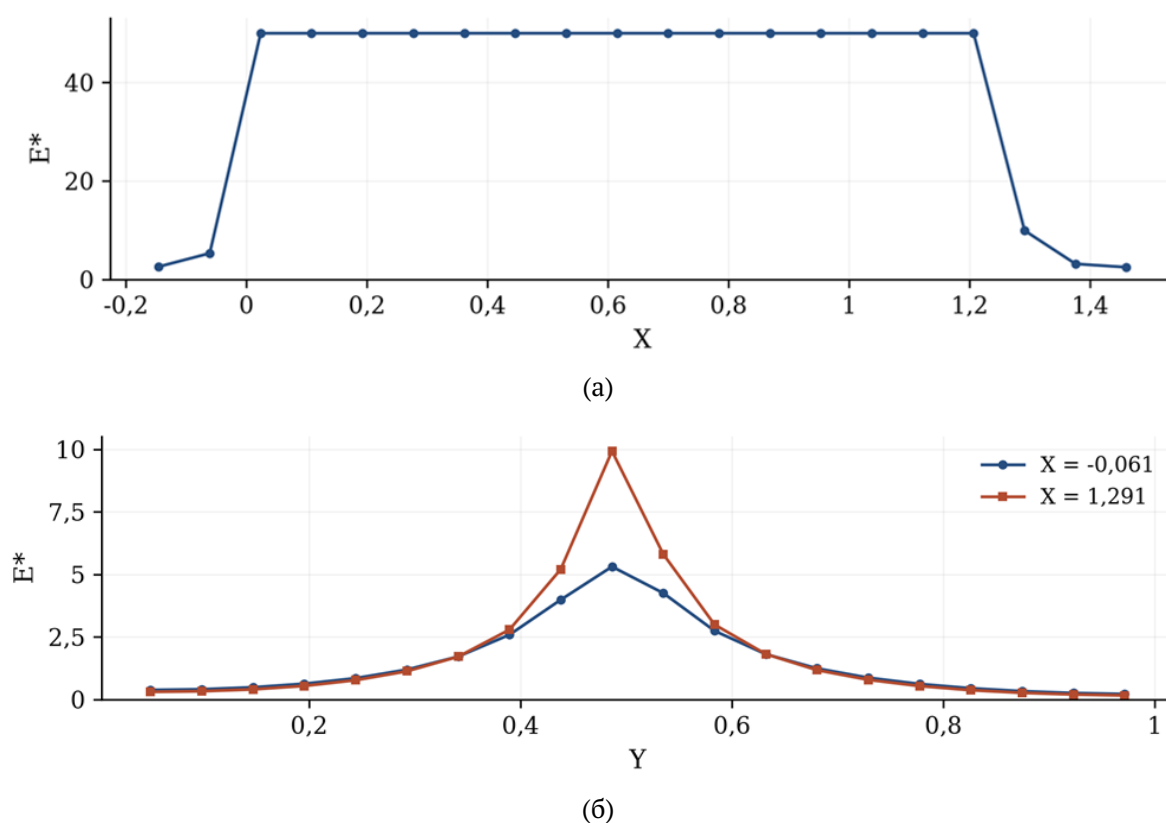


Рис. 4. Профили безразмерного модуля поля E^* : а) — вдоль X при $Y = 0,4865$; б) — вдоль Y при $X = -0,0610$ и $X = 1,2910$

и профили показывают, что повышенное боковое поле сосредоточено вблизи уровня зазора.

Правое боковое значение в выбранном сечении примерно в 1,87 раза больше левого. Эта разница относится к указанным точкам и сама по себе не определяет асимметрию тока через поверхности электродов. Приведённые максимумы характеризуют пространственное разрешение имеющейся выборки. Для исследования поля непосредственно у кромки нужны дополнительные отчёты и проверка сеточной зависимости.

Ненулевое поле в боковых областях согласуется с предположением о возможности паразитного растворения вне зоны формообразования. Вместе с тем расчёт поля не описывает состояние пассивной плёнки. Для установления механизма повреждений требуется сопоставить распределение тока на поверхности с электрохимическими характеристиками сплава и результатами наблюдений. Зависимость анодного поведения от состава среды и поляризации, показанная для комбинированного электрода в [4], подчёркивает необходимость такого сопоставления.

Расчёт позволяет выделить участки, для которых целесообразно проверить изменение формы электрода-инструмента или размещение изоляционного экрана. Для оценки выбранного варианта следует повторить решение при изменённой геометрии и сравнить поле в рабочем зазоре и боковых областях. Применение расчётного профилирования при технологической подготовке ЭХО рассмотрено в [1, 2].

Дальнейшее развитие модели связано с учётом течения электролита и изменения формы обрабатываемой поверхности. Гидродинамическое описание явления струйности при ЭХО предложено в работе [6]. Задача изменения формы анода при неподвижном катоде-инструменте рассматривается в [7]. Включение этих процессов позволит исследовать изменение распределения поля в ходе обработки.

4. Выводы

1. Методом конечных элементов в ELCUT рассчитано электрическое поле в безразмерной двумерной модели межэлектродного пространства. По выборке из 420 точек построены карта модуля напряжённости, изолинии в боковых областях и координатные профили.
2. В выбранном сечении рабочего зазора E^* изменяется от 49,9962 до 50,0000. Наибольшие значения в левой и правой боковых выборках равны 5,31094 и 9,92884. Повышенное боковое поле сосредоточено вблизи уровня зазора и уменьшается при удалении от него вдоль рассмотренных направлений.
3. Полученное распределение позволяет наметить варианты изменения геометрии инструмента и размещения экранов. Их влияние на поле и качество поверхности следует проверить дополнительными расчётами и экспериментами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов / Author Contributions

Концептуализация / Conceptualization: АРУ (ARU); Методология / Methodology: АРУ (ARU), ААС (AAS), НМШ (NMSH); Программное обеспечение / Software: АРУ (ARU), НМШ (NMSH); Верификация данных / Validation: НМШ (NMSH), ЕРШ (ERSH); Получение финансирования / Funding acquisition: НМШ (NMSH), ЕРШ (ERSH); Проведение исследования / Investigation: АРУ (ARU), ААС (AAS), НМШ (NMSH); Ресурсы / Resources: АРУ (ARU); Администрирование данных / Data curation: НМШ (NMSH), ЕРШ (ERSH); Создание черновика рукописи / Writing — original draft: ААС (AAS), ЕРШ (ERSH); Создание рукописи и ее редактирование / Writing — review & editing: ААС (AAS), НМШ (NMSH); Визуализация / Visualization: АРУ (ARU), ААС (AAS); Руководство исследованием / Supervision: НМШ (NMSH); Администрирование проекта / Project administration: АРУ (ARU); Получение финансирования / Funding acquisition: НМШ (NMSH).

Список литературы / References

- [1] Нехорошев МВ, Проничев НД, Смирнов ГВ. Автоматизированное профилирование электродов-инструментов при импульсной электрохимической обработке. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2014;13(5-3):158–166. [https://doi.org/10.18287/1998-6629-2014-0-5-3\(47\)-158-166](https://doi.org/10.18287/1998-6629-2014-0-5-3(47)-158-166)
Nekhoroshev MV, Pronichev ND, Smirnov GV. Automated profiling of tool electrodes in pulsed electrochemical machining. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2014;13(5-3):158–166. (in Russian)
- [2] Нехорошев МВ, Проничев НД, Смирнов ГВ. Методика создания трёхмерных твёрдотельных моделей электродов-инструментов для импульсной электрохимической обработки деталей газотурбинных двигателей в CAD-системе с их параметрической связью с программным модулем профилирования. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2015;14(3-2):418–424. <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-3-418-424>
Nekhoroshev MV, Pronichev ND, Smirnov GV. Procedure for creating three-dimensional solid models of tool electrodes for pulsed electrochemical machining of gas turbine engine parts in a CAD system with parametric coupling to a profiling module. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2015;14(3-2):418–424. (in Russian)
- [3] Смирнов ГВ. Исследование наводораживания при окончательной импульсной электрохимической обработке пера лопаток компрессора из титанового сплава BT9. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2008;7(3):66–72. [https://doi.org/10.18287/2541-7533-2008-0-3\(16\)-66-72](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2008-0-3(16)-66-72)
Smirnov GV. Investigation of hydrogen absorption during final pulsed electrochemical machining of compressor blade airfoils made of VT9 titanium alloy. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2008;7(3):66–72. (in Russian)
- [4] Дресвянников АФ, Салемгараева ЛР, Чонг ФТ. Особенности анодного поведения комбинированного электрода «железо–титан» в галогенид-содержащих электролитах. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020;56(3):317–322. <https://doi.org/10.31857/S0044185620030134>
Dresvyannikov AF, Salemgaraeva LR, Chong FT. Features of the Anode Behavior of the Combined Iron–titanium Electrode in Halide-Containing Electrolytes. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020;56(3):596–602. <https://doi.org/10.1134/S2070205120030132>
- [5] Кошев АН, Варенцов ВК. Краевые условия для дифференциальных уравнений, описывающих электрохимические процессы в реакторах с проточными трехмерными электродами. *Математическое моделирование*. 2014;26(2):11–23. <https://elibrary.ru/rxprmp>
Koshev AN, Varentsov VK. Modeling Boundary Conditions for the Differential Equations, Describing Electrochemical Processes in the Reactors With the Flow Three-Dimensional Electrodes. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014;26(2):11–23. (in Russian)
- [6] Миназетдинов НМ. Гидродинамическая модель явления «струйности» при электрохимической обработке металлов. *Прикладная математика и механика*. 2021;85(5):664–674. <https://doi.org/10.31857/S0032823521050064>
Minazetdinov NM. A hydrodynamic model of the striation phenomenon in electrochemical machining of metals. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2021;85(5):664–674. (in Russian)
- [7] Миназетдинов НМ. Электрохимическая обработка металлов неподвижным катодом-инструментом. *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление»*. 2024;(2):3–9. <https://elibrary.ru/kwqnxr>
Minazetdinov NM. Electrochemical Machining of Metals With Motionless Cathode-Tools. *Vestnik of the Russian New University. Series "Complex Systems: models, analysis and management"*. 2024;(2):3–9. (in Russian)

Сведения об авторах / Information about the Authors

Александра Алексеевна Соколова

Уфимский Университет Науки и Технологий, Уфа,
Российская Федерация

Aleksandra A. Sokolova

Ufa university of science and technology, Ufa, Russian Federation
alexandrakrasich@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1528-8778

Наталья Михайловна Шерыхалина

доктор техн. наук, профессор
Уфимский Университет Науки и Технологий, Уфа,
Российская Федерация

Natalia M. Sherykhalina

Sc.D. (Engineering), Prof.
Ufa university of science and technology, Ufa, Russian Federation
n_sher2@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2808-1311

Айрат Ренатович Ураков

кандидат физ.-мат. наук, доц.
Уфмский Университет Науки и Технологий, Уфа,
Российская Федерация

Airat R. Urakov

Ph.D. (Phys. & Math.), Assist. Prof.
Ufa university of science and technology, Ufa, Russian Federation
airat@infomobil.ru
ORCID: 0009-0000-8871-5163

Екатерина Ринатовна Шаймарданова

Уфимский Университет Науки и Технологий, Уфа,
Российская Федерация

Ekaterina R. Shaimardanova

Ufa university of science and technology, Ufa, Russian Federation
ORCID: 0009-0008-6067-0504