

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.9.047

EDN: EQVRDD

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-64-71



Моделирование электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали

Н.А. Швалева^{1✉}, А.А. Фадеев², И.Я. Шестаков³

¹⁻³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – моделирование электрического поля в межэлектродном зазоре в условиях электрохимического формообразования полости тонкостенной детали ракетно-космической техники. В исследовании использовалось моделирование процесса электрохимического формообразования полости при постоянном напряжении в стационарном режиме в среде COMSOL Multiphysics. Моделирование проводилось для схемы электрохимического формообразования с подвижным катодом с вертикальной и горизонтальной подачей к обрабатываемой поверхности заготовки с поддержанием постоянного межэлектродного зазора. Условия моделирования были приняты следующие: материал трубки катода – нержавеющая сталь 12X18H10T; материал тонкостенной детали – алюминиевый сплав АМг6; электролит – раствор NaNO₃. При моделировании электрического поля в межэлектродном зазоре учитывался процесс теплообмена. В ходе моделирования электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали был получен макрос, который позволяет адаптировать моделирование процесса под разные входные условия процесса. В результате моделирования были получены следующие картины распределения: плотности тока в катоде, потенциалов, электрического поля в межэлектродном зазоре и прилегающей к нему области, температуры процесса электрохимического формообразования. Согласно результатам моделирования, установлено, что линии электрического поля направлены к катоду от периферии заготовки. Это означает, что в заданной области происходит анодное растворение материала, что характеризует закон распределения потенциалов в электрохимической ячейке. Согласно полученной при моделировании картине распределения температуры установлено, что ее повышение в зоне обработки незначительное. Показано, что увеличение температуры электролита приводит к пропорциональному увеличению температуры стенки. Таким образом, проведенное исследование дает теоретическое представление изучаемого процесса.

Ключевые слова: электрохимическое формообразование, моделирование, постоянное напряжение, электрическое поле, катод, тонкостенная деталь

Для цитирования: Швалева Н.А., Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Моделирование электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 64–71. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-64-71>. EDN: EQVRDD.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Electric field simulation in the electrochemical machining of a thin-walled part cavity

Natalya A. Shvaleva^{1✉}, Aleksandr A. Fadeev², Ivan Ya. Shestakov³

¹⁻³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The article is aimed at simulating an electric field in the interelectrode gap during the electrochemical machining of a thin-walled part cavity for aerospace equipment. The study involved simulating the process of electrochemical cavity machining at a constant voltage in a steady-state mode in the COMSOL Multiphysics environment. The simulation was carried out for the scheme of electrochemical machining with a movable cathode and vertical and horizontal feeding to the workpiece surface undergoing machining while maintaining a constant interelectrode gap.

The following simulation conditions were adopted: 12Cr18Ni10Ti stainless steel as the material of the cathode tube; AlMg6 aluminum alloy as the material of the thin-walled part; NaNO₃ solution as the electrolyte. When simulating the electric field in the interelectrode gap, the heat exchange process was taken into account. The simulation of the electric field in the electrochemical cavity machining of a thin-walled part yielded a macro that allows the process simulation to be adapted to different input process conditions. As a result of the simulation, the following distribution patterns were obtained: current density in the cathode, potentials, electric field in the interelectrode gap and adjacent area, and process temperature of electrochemical machining. The simulation results show that the electric field lines are directed toward the cathode from the workpiece periphery. This means that anodic dissolution of material occurs in a given region, which characterizes the law concerning the distribution of potentials in an electrochemical cell. The temperature distribution pattern obtained in the simulation revealed that a temperature increase in the machining zone is insignificant. An increase in electrolyte temperature is shown to result in a proportional increase in wall temperature. Thus, the conducted study provides a theoretical insight into the examined process.

Keywords: electrochemical shaping, modeling, direct current voltage, electric field, cathode, thin-walled part

For citation: Shvaleva N.A., Fadeev A.A., Shestakov I.Ya. Electric field simulation in the electrochemical machining of a thin-walled part cavity. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):64-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-64-71>. EDN: EQVRDD.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день обработка тонкостенных и легкодеформируемых деталей является актуальной проблемой. Это можно объяснить тем, что детали данного конструктивного типа обрабатываются фрезерованием. В процессе обработки возможна деформация тонких стенок вследствие механического контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью. Кроме этого, большая часть материала уходит в стружку. В связи с чем следует рассмотреть альтернативные методы обработки, основанные на других законах физики.

В современном машиностроении широко используются электрохимические методы формообразования. Перспективным направлением применения электрохимических методов являются формообразующие, а также отделочные операции изготовления деталей.

Метод электрохимического формообразования (ЭХФ) представляет собой процесс изготовления деталей из металлов и сплавов с заданными размерами, формой и качеством поверхности. В этом процессе металл удаляется из определенных участков путем локального электрохимического растворения⁴ [1–6]. При ЭХФ электрод-инструмент (катод) и заготовка (анод) разделены межэлектродным зазором (МЭЗ), который заполнен раствором электролита. За счет этого обеспечивается отсутствие механического контакта инструмента с заготовкой. Из чего следует, что сравнительно малые давления не могут деформировать тонкую стенку детали и, кро-

ме того, практически отсутствует износ инструмента.

Однако необходимо отметить, что отсутствие прямого контакта инструмента с заготовкой является существенным недостатком в процессе электрохимического формообразования. Это приводит к снижению точности обработки. Помимо этого, к отклонению формы получаемой детали от заданной приводит низкая локализация процесса съема материала. Это объясняется тем, что в процессе ЭХФ происходит растворение материала не только в зоне обработки, но и на прилегающих к ней участках поверхности детали. Повысить точность обработки можно рядом предупреждающих мер: подбор состава электролита, кинематика движения катода, управление режимами обработки [7]. Помимо прочего, широко применяют локализацию процесса электрохимического формообразования за счет нанесения диэлектрических покрытий на заготовку.

При ЭХФ характер и значение технологического напряжения (тока), генерируемого источником технологического напряжения (тока), оказывают влияние на скорость анодного растворения металла [8]. Процесс ЭХФ может протекать при постоянном или импульсном напряжении. В силу особенностей протекания процесса метод ЭХФ является перспективным для изготовления тонкостенных и легкодеформируемых деталей.

Целью исследования является моделирование электрического поля при электрохи-

⁴Радкевич М.М., Никифоров В.И., Барон Ю.М., Кобчиков В.С., Коротких М.Т. Электрофизические и электрохимические методы обработки в машиностроении: учебник. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 532 с.

мическом формообразовании полости тонкостенной детали в среде COMSOL Multiphysics.

В связи с этим в статье будут представлены схема процесса и входные параметры электрохимического формообразования, необходимые для моделирования. А также будут показаны результаты моделирования электрохимического формообразования при постоянном напряжении.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрохимическое формообразование – сложный процесс, который подчиняется законам электрохимии, электромагнитного поля, гидродинамики и тепломассообмена. В связи с этим, используя исследования особенностей этого процесса и их математическое представление, формируется общее математическое описание процесса электрохимического формообразования [9]. Во время электрохимического формообразования электролит в межэлектродном зазоре нагревается за счет прохождения через него рабочего тока. Из-за неравномерной плотности внутреннего источника тепла во всем объеме межэлектродного пространства, которая вызвана изменением удельной электропроводности среды, температура будет распределяться соответствующим образом. В процессе электрохимического формообразования выделившееся тепло передается в катод, обрабатываемую деталь и отводится за счет непрерывной прокачки потока электролита. Для расчета изменения температуры по всему объему МЭЗ используют средние значения температуры в сечениях. Поэтому при моделировании электрического поля необходимо учитывать процессы теплообмена.

Проанализированы исследования [10–17], где осуществлялось моделирование процесса электрохимического формования в различных программных комплексах. Также известны работы [18–20], которые представляют программы для расчета плотности тока, интегрированные с универсальными системами проектирования.

В рамках работы в COMSOL Multiphysics было проведено моделирование процесса электрохимического формообразования в стационарном режиме, при котором скорость подачи инструмента к заготовке остается постоянной. В данном случае съем в каждой точке поверхности заготовки компенсируется

перемещением участков катода и межэлектродный зазор (a) (рис. 1) не изменяет свою форму со временем.

Существует специальная конструкция катода, которая копирует форму полости получаемой тонкостенной детали [8]. Принцип работы электрохимического формообразования заключается в следующем: под давлением электролит поступает в катод, затем через отверстия в трубке катода воздействует на обрабатываемый материал.

Электрохимическое формообразование с постоянным напряжением осуществляется по схеме с подвижным катодом с вертикальной (V_z) и горизонтальной (V_y) подачей к заготовке с поддержанием постоянного межэлектродного зазора (a) (рис. 1).

Программа COMSOL Multiphysics работает следующим образом:

- выполняется первичная настройка модели;
- выбирается размерность пространства;
- определяются физический интерфейс поставленной задачи и тип исследования;
- происходит графическое задание геометрии модели;
- осуществляется выбор материалов;
- задание глобальных определений задачи исследования;
- задание граничных условий расчета;
- происходит построение сетки конечных элементов;
- производится расчет.

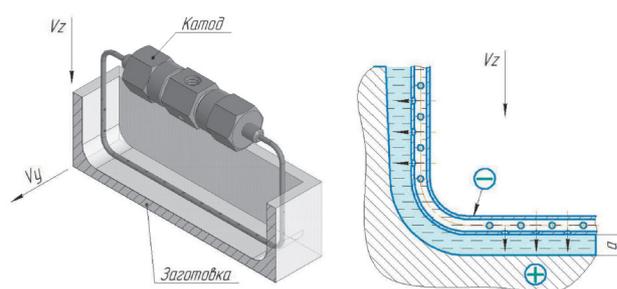


Рис. 1. Схема электрохимического формообразования тонкостенной детали профильным катодом
Fig. 1. Diagram of electrochemical shaping of a thin-walled part with a profile cathode

Условия моделирования следующие:

- материал трубки катода – нержавеющая сталь 12X18H10T ГОСТ 5632-2014;
- материал тонкостенной детали – алюминиевый сплав АМг6 ГОСТ 4784-97;
- электролит NaNO_3 .

Параметры моделирования
 Modeling parameters

Наименование	Обозначение	Значение
Диаметр трубки	d , мм	3
Размер полости детали	длина x высота, мм	76 x 25
Межэлектродный зазор	a , мм	0,05
Приложенное напряжение	U , В	20
Тип напряжения	постоянное	–
Ток	I , А	10
Входное значение температуры электролита	$T_{вх}$, °С	20

Параметры процесса электрохимического формообразования, необходимые для моделирования, представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе моделирования электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали был получен макрос, позволяющий адаптировать моделирование процесса к различным входным параметрам процесса.

В результате моделирования были получены:

- графическое изображение распределения плотности тока в катоде (рис. 2 а) и распределения потенциалов (рис. 2 б);
- графическое изображение распреде-

ления электрического поля (рис. 3 а) в межэлектродном зазоре и прилегающей к нему области;

– характер распределения температуры процесса электрохимического формообразования (рис. 3 б).

Результаты моделирования характеризуют процесс электрохимического формообразования. Из результатов моделирования следует, что линии направлены к катоду от периферии заготовки. Это означает, что в заданной области происходит растворение материала, что характеризует закон распределения потенциалов в электрохимической ячейке. Прилегающие поверхности, не участвующие в обработке, должны быть изолированы. Результат температурного распределения показывает незначительное повышение темпера-

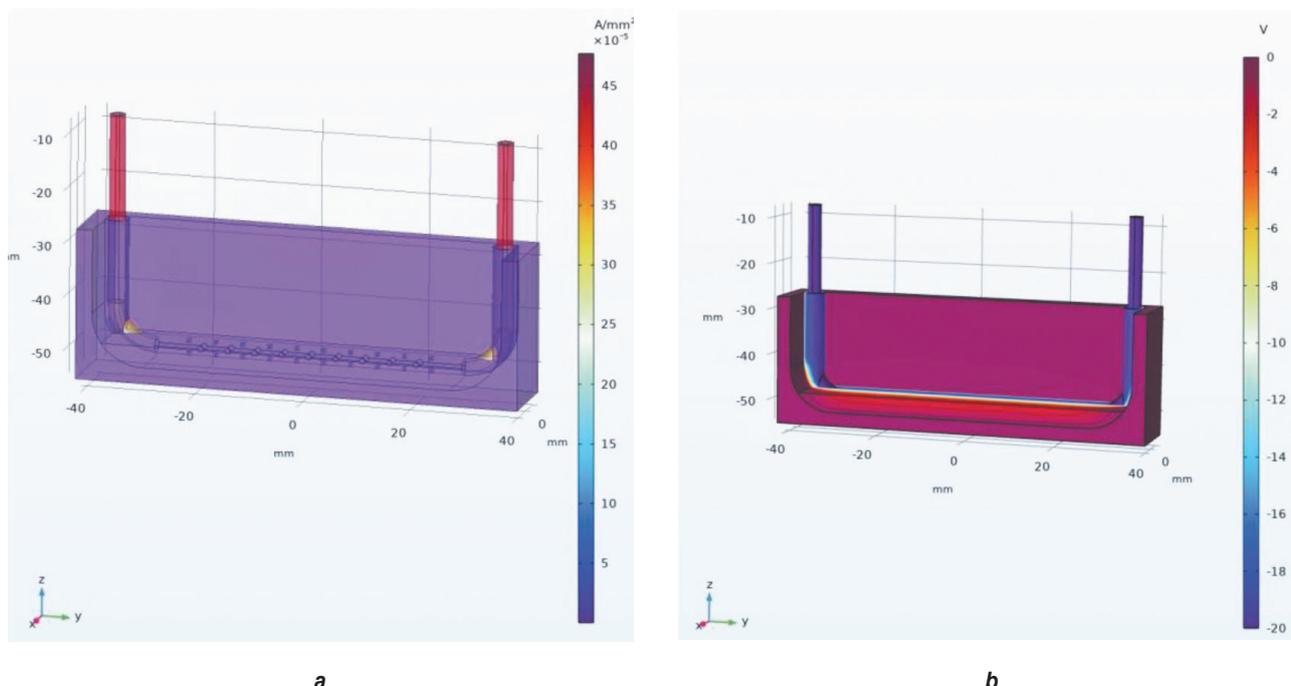
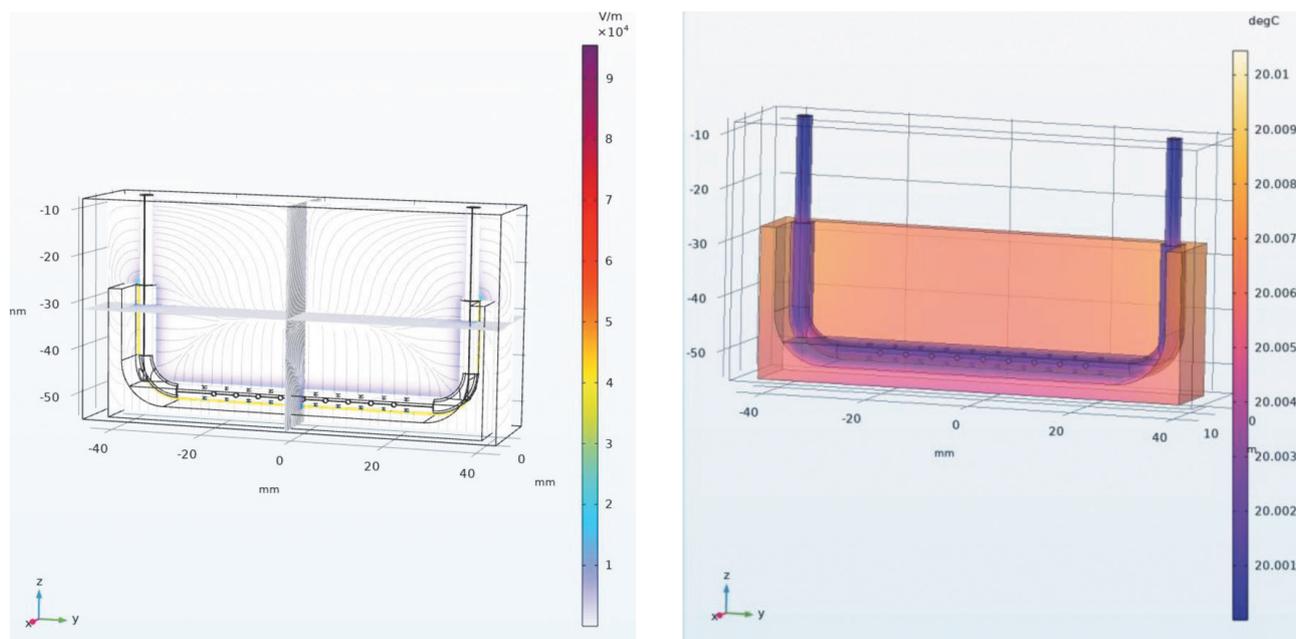


Рис. 2. Результаты моделирования: а – распределение плотности тока; б – распределение потенциалов
 Fig. 2. Modeling results: a – current density distribution; b – potential distribution



а **б**
Рис. 3. Результаты моделирования: а – распределение электрического поля; б – распределение температуры
Fig. 3. Modeling results: a – electric field distribution; b – temperature distribution

туры в зоне обработки. Это объясняется тем, что в процессе электрохимической обработки в межэлектродном пространстве происходит нагрев электролита под воздействием рабочего тока. В процессе обработки тепло передается через катод, обрабатываемую деталь и уносится потоком электролита. Увеличение температуры электролита приводит к пропорциональному увеличению температуры стенки. В силу того, что процесс происходит при непрерывной прокачке электролита, в реальных условиях электрохимического формообразования изменением температуры можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование дает теоретическое представление процесса. По окончании проведенной работы была достигнута поставленная цель исследования, а именно – выполнено моделирование распределения электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали в среде COMSOL Multiphysics. Изучен вопрос влияния особенностей теплообмена на электрический аспект процесса ЭХФ. Кроме того, был получен макрос, с помощью которого можно моделировать условия электрохимического формообразования с разными входными параметрами.

Список источников

1. Давыдов А.Д., Волгин В.М., Любимов В.В. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования // Электрохимия. 2004. Т. 40. № 12. С. 1438–1480. EDN: OXEOVN.
2. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining // Procedia CIRP. 2013. Vol. 6. P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>.
3. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.
4. Li Shicheng, Ming Pingmei, Zhang Junzhong, Zhang Yunyan, Yan Liang. Concurrently fabricating precision meso- and microscale cross-scale arrayed metal features and components by using wire-anode scanning electroforming technique // Micromachines. 2023. Vol. 14. Iss. 5. P. 979. <https://doi.org/10.3390/mi14050979>.
5. Пеньков А.А. Электрохимическая обработка с импульсами наносекундной длительности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 236–240. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-2-236-241>. EDN: FPFLKT.
6. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. Non-traditional micromachining processes: fundamentals and applications. Berlin: Springer, 2017. 422 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52009-4>.
7. Силкин С.А., Аксенов Е.Н., Ликризон Е.А., Петренко В.И., Дикусар А.И. Локализация анодного растворения жаро-

- прочных хромоникелевых сплавов в условиях импульсной электрохимической размерной обработки // *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 2019. № 2. С. 1–9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2629536>.
8. Волгин В.М., Сидоров В.Н., Кабанова Т.Б., Давыдов А.Д. Влияние формы импульсов напряжения на электрохимическую обработку // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 10. С. 611–618. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-10-611-619>. EDN: VCNOZJ.
9. Швалева Н.А., Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Особенности процесса электрохимической обработки тонкостенных деталей катодом-инструментом // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 3. С. 37–42. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-37-42>. EDN: QGYZOY.
10. Сидоров В.Н., Волгин В.М. Моделирование электрохимической обработки вращающимися электродами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 5. С. 453–458. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-453-458>. EDN: SKIYRU.
11. Ren Zhiyuan, Wang Dengyong, Cui Guowei, Cao Wenjian, Zhu Di. Optimize the flow field during counter-rotating electrochemical machining of grid structures through an auxiliary internal fluid flow pattern // *Precision Engineering*. 2021. Vol. 72. Iss. 13. P. 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.008>.
12. Wang Dengyong, Li Jinzheng, He Bin, Zhu Di. Analysis and control of inter-electrode gap during leveling process in counter-rotating electrochemical machining // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019. Vol. 32. Iss. 11. P. 2557–2565. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.022>.
13. Wang Dengyong, Wang Qianqian, Zhang Jun, Le Huayong, Zhu Zengwei, Zhu Di. Counter-rotating electrochemical machining of intensive cylindrical pillar array using an additive manufactured cathode tool // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 211. P. 106653. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106653>.
14. Li Jinzheng, Wang Dengyong, Zhu Di, He Bin. Analysis of the flow field in counter-rotating electrochemical machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 275. P. 116323. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116323>.
15. Проничев Н.Д., Палютин С.В., Нехорошев М.В. Моделирование электрических полей в электрохимической ячейке в условиях эхо средствами программного комплекса «ANSYS» // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. 2006. № 2-1. С. 317–321. EDN: IPJAZH.
16. Fukukawa M., Tong L. Effect of mass flow induced by a reciprocating paddle on electroplating // *Effect of Mass Flow Induced by a Reciprocating Paddle on Electroplating: Conference (Boston, 4–6 October 2017)*. Boston, 2017. P. 1–6.
17. Cao Wenjian, Wang Dengyong, Zhu Di. Modeling and experimental validation of interelectrode gap in counter-rotating electrochemical machining // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 187. P. 105920. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105920>.
18. Purcar M., Dorochenko A., Bortels L., Denconinck J., Den Bossche B.V. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 203. Iss. 1-3. P. 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.082>.
19. Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149. Iss. 1-3. P. 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.050>.
20. Bortels L., Purcar M., Den Bossche B.V., Deconinck J. A user-friendly simulation software tool for 3D ECM // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149. Iss. 1-3. P. 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.051>.

References

1. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical dimensional processing of metals: shaping process. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2004;40(12):1438-1480. (In Russ.). EDN: OXEOVN.
2. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*. 2013;6:13-26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>.
3. Sedykin F.V. *Dimensional electrochemical processing of machine parts*. Moscow: Mashinostroenie; 1976, 302 p. (In Russ.).
4. Li Shicheng, Ming Pingmei, Zhang Junzhong, Zhang Yunyan, Yan Liang. Concurrently fabricating precision meso- and microscale cross-scale arrayed metal features and components by using wire-anode scanning electroforming technique. *Micromachines*. 2023;14(5):979. <https://doi.org/10.3390/mi14050979>.
5. Penkov A.A. Electrochemical treatment with nanosecond pulses. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2022;2:236-240. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-2-236-241>. EDN: FPFLKT.
6. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. *Non-traditional micromachining processes: fundamentals and applications*. Berlin: Springer; 2017, 422 p.
7. Silkin S.A., Aksenov E.N., Likrizon E.A., Petrenko V.I., Dikusar A.I. Anodic dissolution localization under pulsed electrochemical machining of heat-resistant nickel-chromium alloys. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 2019;2:1-9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2629536>.
8. Volgin V.M., Sidorov V.S., Kabanova T.B., Davydov A.D. Effect of the shape of voltage pulses on electrochemical machining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2021;10:611-618. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-10-611-619>. EDN: VCNOZJ.
9. Shvaleva N.A., Fadeev A.A., Shestakov I.Ya. The features of the process of electrochemical machining of thin-walled parts with a cathode tool. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2022;3:37-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-37-42>. EDN: QGYZOY.

10. Sidorov V.N., Volgin V.M. Modeling of electrochemical machining with rotating electrodes. *Texnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2022;5:453-458. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-453-458>. EDN: SKIYRU.
11. Ren Zhiyuan, Wang Dengyong, Cui Guowei, Cao Wenjian, Zhu Di. Optimize the flow field during counter-rotating electrochemical machining of grid structures through an auxiliary internal fluid flow pattern. *Precision Engineering*. 2021;72(13):448-460. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.008>.
12. Wang Dengyong, Li Jinzheng, He Bin, Zhu Di. Analysis and control of inter-electrode gap during leveling process in counter-rotating electrochemical machining. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019;32(11):2557-2565. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.022>.
13. Wang Dengyong, Wang Qianqian, Zhang Jun, Le Huayong, Zhu Zengwei, Zhu Di. Counter-rotating electrochemical machining of intensive cylindrical pillar array using an additive manufactured cathode tool. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;211:106653. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106653>.
14. Li Jinzheng, Wang Dengyong, Zhu Di, He Bin. Analysis of the flow field in counter-rotating electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;275:116323. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116323>.
15. Pronichev N.D., Palyutin S.V., Nehoroshev M.V. Modeling of electric fields in an electrochemical cell in conditions of electrochemical processing by means of program Ansys. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2006;2-1:317-321. (In Russ.). EDN: IPJAZH.
16. Fukukawa M., Tong L. Effect of mass flow induced by a reciprocating paddle on electroplating. In: *Effect of Mass Flow Induced by a Reciprocating Paddle on Electroplating: Conference*. 4–6 October 2017, Boston. Boston; 2017, p. 1-6.
17. Cao Wenjian, Wang Dengyong, Zhu Di. Modeling and experimental validation of interelectrode gap in counter-rotating electrochemical machining. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;187:105920. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105920>.
18. Purcar M., Dorochenko A., Bortels L., Denconinck J., Den Bossche B.V. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;203(1-3):58-71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.082>.
19. Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;149(1-3):472-478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.050>.
20. Bortels L., Purcar M., Den Bossche B.V., Deconinck J. A user-friendly simulation software tool for 3D ECM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;149(1-3):486-492. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.051>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Швалева Наталья Александровна,

аспирант,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский
рабочий», 31, Россия
✉ natalyashvaleva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>

Natalya A. Shvaleva,

Postgraduate Student,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31 gazety Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk
660037, Russia
✉ natalyashvaleva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>

Фадеев Александр Александрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технология машиностроения,
Сибирский государственный университет науки
и технологий
им. академика М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский
рабочий», 31, Россия
fadeev.77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>

Aleksandr A. Fadeev,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31 gazety Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk
660037, Russia
fadeev.77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>

Шестаков Иван Яковлевич,

д.т.н., доцент,
профессор кафедры электронной техники
и телекоммуникаций,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский
рабочий», 31, Россия
yakovlevish@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

Ivan Ya. Shestakov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electronic Engineering
and Telecommunications,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31 gazety Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk
660037, Russia
yakovlevish@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.01.2024 г.; принята к публикации 20.01.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 10.01.2024; accepted for publication 20.01.2024.