

Особенности процесса электрохимической обработки тонкостенных деталей катодом-инструментом

Н.А. Швалева^a, А.А. Фадеев^b, И.Я. Шестаков^c

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

^a natalyashvaleva@yandex.ru, ^b fadeev.77@mail.ru, ^c yakovlevish@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

Статья поступила 05.09.2022, принята 19.09.2022

Электрохимическая обработка является прогрессивным методом обработки металлов и сплавов и находит все большее применение в машиностроении, в том числе в ракетно-космической отрасли. Перспективным направлением применения электрохимической обработки является изготовление тонкостенных и легкодеформируемых деталей. Указанный метод обладает широкими технологическими возможностями и рядом важных преимуществ по сравнению с традиционными методами обработки резанием, однако в силу особенностей процесса темпы внедрения в производство все еще невелики. Электрохимическая обработка является сложным процессом, который описывается законами электрохимии, гидродинамики, электромагнитного поля и теплообмена. В силу этого на основе изучения особенностей процесса и их математического представления составляется общее математическое описание процесса электрохимической обработки. В статье предложена конструкция катода-инструмента для электрохимической обработки тонкостенных и легкодеформируемых деталей ракетно-космической техники. Кроме того, в статье представлена установка для реализации электрохимической обработки разработанным инструментом. Выполнено математическое описание особенностей процесса и выведена зависимость скорости съема металла от величины торцевого зазора катода-инструмента. Определены параметры процесса. Математическое описание выполнено для стационарного электрохимического формообразования в двухмерной постановке задачи. Указанная зависимость получена на основе уравнений Максвелла, где рассматриваются отдельно электрическое и магнитное поле. Поэтому, исследуя электрическое поле с учетом закона Ома в дифференциальной форме и решая уравнение Лапласа для кольцевого электрического поля с потенциалом, определено уравнение скорости съема металла, преобразованное относительно известных величин. По выведенной зависимости получены упрощенное уравнение и величина аппроксимации, которая характеризует точность результата. Поэтому по определенным параметрам и по полученному уравнению можно регулировать процесс электрохимической обработки.

Ключевые слова: электрохимическая обработка; катод-инструмент; параметры процесса.

The features of the process of electrochemical machining of thin-walled parts with a cathode tool

N.A. Shvaleva^a, A.A. Fadeev^b, I.Ya.Shestakov^c

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

^a natalyashvaleva@yandex.ru, ^b fadeev.77@mail.ru, ^c yakovlevish@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

Received 05.09.2022, accepted 19.09.2022

The electrochemical machining is a progressive method of processing metals and alloys, and is increasingly used in mechanical engineering, including the rocket and space industry. The promising direction of application of electrochemical machining is the manufacture of thin-walled and easily deformable parts. This method has wide technological capabilities and a number of important advantages compared to traditional cutting methods. However, due to the features of the process, the pace of implementation in production is still high. Electrochemical machining is a complex process, which is described by the laws of electrochemistry, hydrodynamics, electromagnetic field and heat and mass transfer. Because of this, based on the study of the features of the process and their mathematical representation, a general mathematical description of the process of electrochemical machining is compiled. The article proposes the design of a cathode-tool for electrochemical machining of thin-walled and easily deformable parts of rocket and space technology. In addition, the article presents an installation for the implementation of electrochemical machining by the developed tool. The mathematical description

of the features of the process is made and the dependence of the metal removal rate on the size of the end gap of the cathode-tool is derived. The process parameters are defined. The mathematical description is made for stationary electrochemical shaping in a two-dimensional formulation of the problem. This dependence was obtained on the basis of Maxwell's equations, where the electric and magnetic fields are considered separately. Therefore, considering the electric field taking into account Ohm's law in differential form and solving the Laplace's equation for an annular electric field with a potential, the metal removal rate equation is determined, converted from known values. Based on the derived dependence, a simplified equation and an approximation value were obtained, which characterizes the accuracy of the result. Therefore, according to certain parameters and according to the resulting equation, it is possible to regulate the process of electrochemical machining.

Keywords: electrochemical machining; cathode tool; parameters of the process.

Введение. Метод электрохимической обработки (ЭХО) находит все большее применение в современном машиностроении, в том числе ракетно-космической технике. Электрохимическая обработка — это метод изготовления деталей из металлов и сплавов с заданной формой, размерами и качеством поверхности, в котором металл с заданных мест удаляется путем локального электрохимического растворения [1]. Перспективным направлением применения электрохимической обработки является изготовление тонкостенных и легкодеформируемых деталей ракетно-космической техники. В настоящее время обработка этих деталей осуществляется традиционным механическим методом обработки — фрезерованием, где вследствие механического контакта инструмента возникает вероятность деформации тонких стенок детали, а также большая часть материала уходит в стружку. В связи с этим обработка тонкостенных и легкодеформируемых деталей является актуальной проблемой.

Перспективность применения ЭХО обусловлена преимуществами метода. Для получения более точной формы обрабатываемой детали процесс проводят при поддержании малого межэлектродного зазора, который, в свою очередь, обеспечивает отсутствие механического контакта инструмента с заготовкой. Это означает, что износ инструмента практически отсутствует, а сравнительно малые давления не могут вызвать деформацию в поверхностном слое детали [2]. Кроме того, на показатели обрабатываемости не оказывают существенного влияния физико-механические свойства заготовки (твердость, вязкость, прочность), что увеличивает производительность процесса и повышает точность обработки [3]. Для достижения высокой производительности растворение производится при высоких плотностях тока. Протекание электрохимических процессов в течение времени обработки обеспечивается прокачкой раствора электролита через межэлектродный зазор под давлением с целью выноса из зоны обработки продуктов реакции (газа, шлама) и выделяющегося тепла.

Целью исследования является изучение особенностей процесса электрохимической обработки тонкостенных деталей катодом-инструментом.

В связи с этим в статье будет предложена конструкция катода-инструмента для электрохимической обработки тонкостенных и легкодеформируемых деталей ракетно-космической

техники. Будут определены параметры процесса, а также рассмотрены особенности процесса электрохимической обработки.

Теоретическая часть. Электрохимическая обработка является сложным процессом, который описывается законами электрохимии, гидродинамики, электромагнитного поля и тепломассообмена. В силу этого на основе изучения особенностей процесса и их математического представления составляется общее математическое описание процесса электрохимической обработки. Известны случаи и методики математического моделирования процесса ЭХО [4–8], а в ряде работ [9–11] предложены программы расчета плотности тока, интегрированные с универсальными системами проектирования.

Технологическими характеристиками процесса электрохимической обработки являются производительность, точность размеров и полученной формы, а также шероховатость обработанных поверхностей. К факторам, влияющим на технологические характеристики процесса, относят объемный электрохимический эквивалент (K_v) обрабатываемого металла (сплава), состав применяемого электролита, его удельную электропроводность (χ), напряжение на электродах (U), плотность тока (i), коэффициент выхода металла по току (η), межэлектродный зазор (a) и технологический припуск [12].

Особенности процесса ЭХО характеризуются законом Ома, учетом влияния параметров и формы границ электрического поля. Закон Ома для электрохимической ячейки записывается в виде [13]:

$$I = \frac{(U - Un) \cdot S \cdot \chi}{a},$$

где I — сила тока, А; Un — потери напряжения в приэлектродных слоях, В; S — площадь катода, м.

Сопротивление электролита в межэлектродном зазоре определим по формуле:

$$R = (U - Un) / I.$$

Исходя из вычисленных значений, можно определить плотность тока инструмента (электрода):

$$i = I / S.$$

Стационарное электрическое поле в электропроводящей среде описывается уравнениями Максвелла, приведенными к виду [12]:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \operatorname{div} \vec{E} = 0, \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{i}, \operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

$\operatorname{Rot} \vec{E} = 0$, поэтому электрическое поле является потенциальным. Вводя потенциал φ и определяя:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi, \quad (1)$$

уравнение $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ преобразуется в уравнение Лапласа:

$$\Delta \varphi = 0. \quad (2)$$

С учетом (1) закон Ома в дифференциальной форме имеет вид:

$$\vec{i} = -x \cdot \operatorname{grad} \varphi. \quad (3)$$

Решение уравнения Лапласа (2) для кольцевого электрического поля с потенциалом φ известно в виде:

$$\varphi = \varphi_1 + \frac{\ln(R/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (4)$$

где φ_1 и R_1 — параметры внутренней, а φ_2 и R_2 — наружной границы. Для схемы ЭХО с цилиндрической выпуклой поверхностью инструмента $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = U_{\text{э}}$. Тогда из уравнения (4) следует:

$$\operatorname{grad} \varphi = \frac{U_{\text{э}}}{R \ln(R_2/R_1)}, \quad (5)$$

где $U_{\text{э}}$ — напряжение в межэлектродном зазоре с учетом потерь напряжения в приэлектродных слоях.

С учетом уравнений (1), (3) и (5) при ЭХО с выпуклой цилиндрической поверхностью ($R_1 = R_k$, $R_2 = R_k + a$) плотность тока на аноде по направлению скорости V равна [12]:

$$i = \frac{x \cdot U_{\text{э}}}{(R_k + a) \ln(1 + a/R_k)},$$

а скорость съема:

$$V_a = \frac{\eta}{\rho} \cdot \frac{x \cdot U_{\text{э}}}{(R_k + a) \ln(1 + a/R_k)}, \quad (6)$$

где ρ — объемная плотность заряда, Кл/м³; R_k — радиус инструмента, м.

Конструктивная часть. Известны специальные конструкции инструментов для получения профильных поверхностей деталей, а также случаи электрохимической обработки проволокой в качестве инструмента [14–18].

Разработана конструкция катода-инструмента (электрода) для обработки профиля полости прямоугольной формы тонкостенной детали из алюминиевого сплава АМг6 (рис. 1).

Конструкция включает тонкостенную трубку 3х1 с отверстиями диаметром 1 мм, выполненными по длине трубки в разных плоскостях; ниппели 2, которые соединены с трубкой паяным соединением; штуцер 3; накидные гайки 4. Для увеличения герметизации штуцерно-ниппельного соединения предусмотрены уплотняющие элементы — резиновые прокладки. В

штуцере выполнены резьбовое отверстие для соединения со шлангом насоса и гладкое отверстие в перпендикулярной плоскости для соединения с двигателем перемещения. В качестве материала трубки используется медь марки М1 ГОСТ 895-2001. Материал ниппелей, штуцера и накидных гаек — нержавеющая сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014. Форма инструмента повторяет профиль полости обрабатываемой детали с учетом величины межэлектродного зазора.

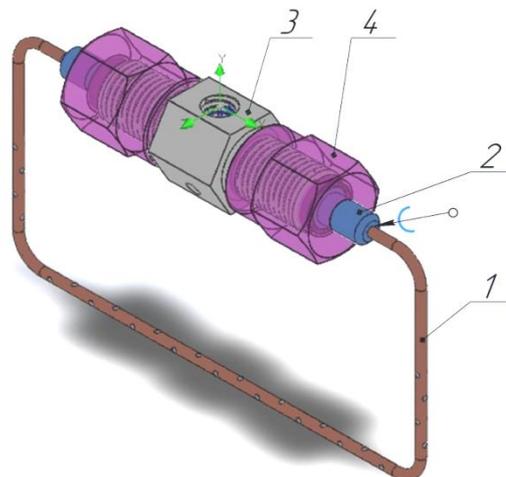


Рис. 1. Катод-инструмент: трубка — 1; ниппель — 2; штуцер — 3; накидная гайка — 4

Процесс ЭХО реализуется установкой на основе линейного электродинамического двигателя, разработанной сотрудниками СибГАУ (рис. 2) [19; 20].

Принцип реализации ЭХО заключается в следующем: электролит под давлением подается в инструмент, вытекая через отверстия в трубке, воздействует на обрабатываемый материал. Катод-инструмент 1 соединяется штифтом с приводом линейного перемещения, который закреплен на бойке линейного электродинамического двигателя (ЛЭДД) 2. Посредством штуцерно-ниппельного соединения инструмент присоединяется к насосу 3. В начале обработки инструмент подается вертикально к поверхности заготовки, когда осуществилось врезание, и полость детали обработана на необходимую глубину, инструмент подается горизонтально, а затем вертикально в обратном направлении, тем самым образуя полость прямоугольной формы. Подача инструмента к заготовке в вертикальном направлении осуществляется за счет программируемого привода линейного перемещения 4. Подача в горизонтальном направлении выполняется шаговыми двигателями 5 позиционного стола 6, где установлена заготовка 7. Управление процессом осуществляется компьютером 8. Питание ЛЭДД, инструмента и заготовки реализуется блоком питания 9. Продукты процесса (шлам, газы) удаляются из зоны обработки под давлением и проходят очистку, далее очищенный электролит попадает в бак для дальнейшей циркуляции. С помощью данной

установки возможна реализация электрохимической обработки с вибрацией на определенных режимах.

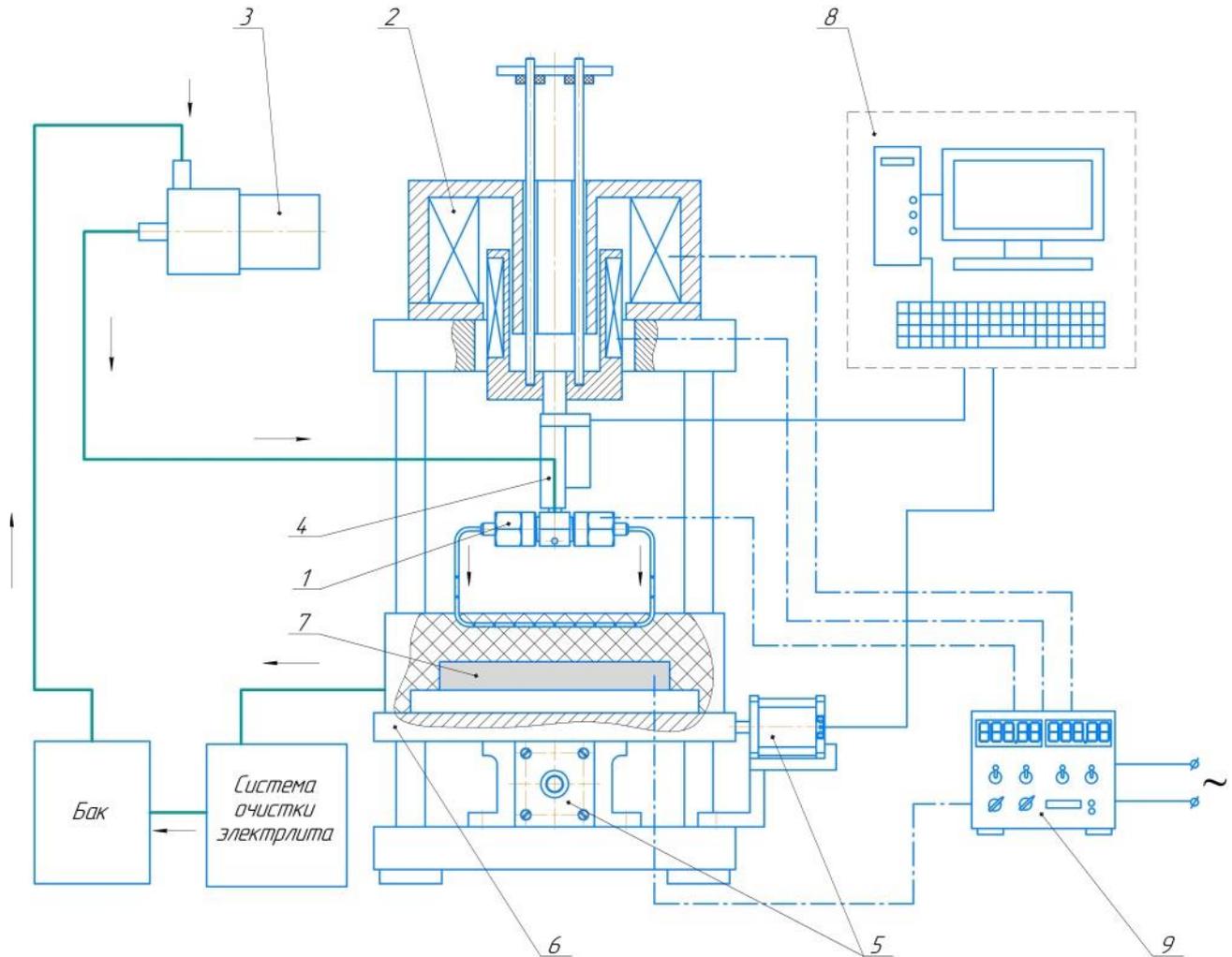


Рис. 2. Установка на основе линейного электродинамического двигателя: катод-инструмент — 1; линейный электродинамический двигатель — 2; насос — 3; привод линейного перемещения — 4; шаговые двигатели — 5; позиционный стол — 6; заготовка — 7; компьютер — 8; блок питания — 9

Расчетная часть. Выполнено математическое описание особенностей процесса и выведена зависимость скорости съема металла от величины торцевого зазора катода-инструмента. Кроме того, определены параметры процесса. Математическое описание выполнено для стационарного электрохимического формообразования в двумерной постановке задачи. В этом случае обработка происходит с постоянной скоростью подачи инструмента

в направлении обрабатываемой поверхности. Съем металла в каждой точке поверхности компенсируется перемещением участков инструмента, и межэлектродный зазор по времени не изменяет свою форму.

Вычисленные и заданные параметры процесса ЭХО профиля полости тонкостенной детали разработанным катодом-инструментом сведены в таблицу.

Таблица. Параметры процесса ЭХО профиля полости тонкостенной детали

Объемный электрохимический эквивалент K_v , $\text{см}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$	Электролит	Удельная электропроводность x , См/м	Напряжение на электродах U , В	Коэффициент выхода металла по току η	Межэлектродный (торцевой) зазор a , мм	Сопротивление электролита в межэлектродном зазоре R , Ом	Сила тока, А	Плотность тока i , А/м^2
0,0021	NaNO_3	0,1606	20	0,8	0,5	9,812	1,661	$5,236 \cdot 10^3$

Преобразуя уравнение (6) к разрешаемому виду относительно известных величин, получаем уравнение скорости съема:

$$V_a = \eta \cdot \frac{S_z}{t} \cdot \frac{x \cdot U_{\text{Э}}}{(R_k + a) \ln(1 + a/R_k)}, \quad (7)$$

где S_z — площадь рассматриваемого участка межэлектродного зазора (рис. 3), м.

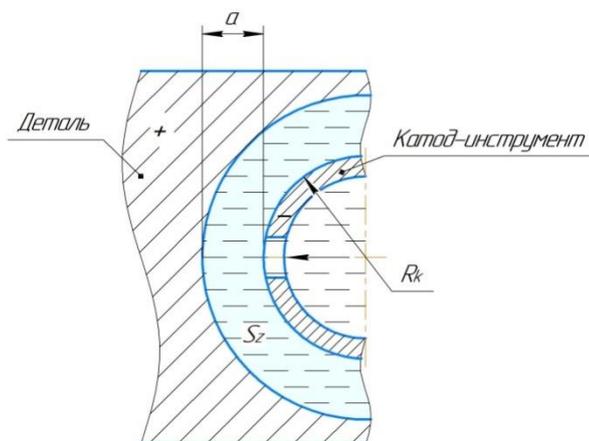


Рис. 3. Схема ЭХО

Анализируя график и выведенное уравнение (7), видно, что с увеличением радиуса кривизны трубки катода-инструмента и уменьшением величины межэлектродного (торцевого) зазора уменьшается влияние формы границ электрического поля на скорость электрохимического растворения. Кроме того, получены упрощенное уравнение и величина аппроксимации $R^2 = 0,9994$, которая характеризует точность результата.

Литература

1. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука, 1990. 272 с.
2. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.
3. Швалева Н.А., Фадеев А.А. Размерная электрохимическая обработка деталей штампов и пресс-форм // Решетневские чтения: материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. (10-12 нояб. 2021 г.). Красноярск, 2021. С. 277-278.
4. Прагиш Кумар М.Р., Пракасан К., Калайчелван К. Экспериментальное исследование и «мультифизическое» моделирование электрохимической обработки отверстий электродами различной формы // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 10. С. 1059-1072.
5. Волгин В.М., До В.Д. Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом: влияние скорости перемещения инструмента на геометрию реза // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2014. № 7. С. 85-93.
6. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode // Annals of the CIRP. 2007. V. 56 (1). P. 241-244.
7. Slatineanu L., Dodun O., Santo O., Acoteata M., Munteanu A. Modelling of the of electrochemical machining process // IFAC MPCPL. 2007. V. 40 (18). P. 475-480.
8. Давыдов А.Д., Волгин В.М., Любимов В.В. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования // Электрохимия. 2004. Т. 40. № 12. С. 1438-1480.

Выведенное уравнение (7) определяет скорость съема металла в зависимости от формы межэлектродного зазора (рис. 4).

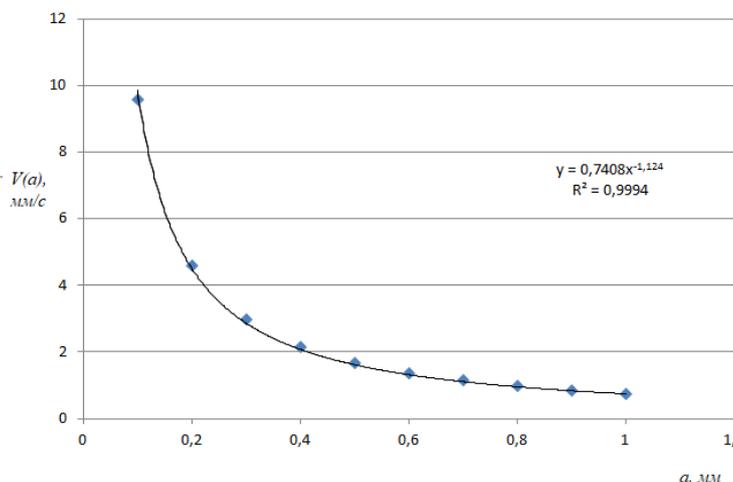


Рис. 4. Зависимость скорости съема металла от торцевого зазора катода-инструмента

Заключение. Для предложенной конструкции катода-инструмента определены параметры процесса ЭХО. Выведенная зависимость в полной мере характеризует особенности электрохимической обработки предлагаемым инструментом, что подтверждается результатами расчета.

9. Shirvani H., Shirvani A., Mirzaee I. Proc. II-nd Int. Conf. on Advances in Production Engineering. Part II. Warsaw. 2001. P. 343.
10. Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B., Deconinck J. // J. Mater. Process. Technol. 2004. V. 149. P. 472.
11. Bortels L., Purcar M., Van den Bossche B., Deconinck J. // J. Mater. Process. Technol. 2004. V. 149. P. 486.
12. Швалева Н.А., Стахнова М.В., Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Параметры процесса электрохимической обработки вафельного фона щелевым катодным инструментом // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов VII Междунар. науч.-практической конф. (12-16 апр. 2021 г.). Красноярск, 2021. Т. 1. С. 66-68.
13. Каримов А.Х., Клоков В.В., Филатов Е.И. Методы расчета электрохимического формообразования. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1990. 291 с.
14. Qu Ningsong, Xu Kun, Zeng Yongbin, Zhu Di. Wire feeding micro electrochemical wire cutting process: пат. CN104475893A Китай, МПК В23Н7/20. Priorities CN201410610757A. 2014-11-04; Publ. 2015-04-01. 5 p.
15. Meng Lingchao, Zeng Yongbin, Zhu Di. Workpiece reciprocating motion micro-electrochemical linear cutting method: пат. CN107350584A Китай, МПК В23Н7/06. Priorities CN201710568357A. 2017-07-13; Publ. 2017-11-17. 10 p.
16. Гимаев Н.З., Сибигагуллин Ж.Х., Зайцев А.Н. Стержневой электрод-инструмент: пат. № 2030261 С1 Рос. Федерация, МПК В23Н 7/22; заявл. 19.12.1990; опубл. 10.03.1995.
17. Мороз И.И., Алексеев Г.А., Водяницкий О.А. Электрохимическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1969. 208 с.
18. Смоленцев Г.П., Смоленцев В.П. Катод-инструмент для размерной электрохимической обработки и способ его

изготовления: пат. № 841891; заявл. 10.04.79; опубл. 30.06.81.

19. Стрюк А.И., Шестаков И.Я., Фадеев А.А. Электродинамический привод подачи инструмента: пат. 2274525 РФ, МПК В23Н 7/30; заявл. 27.09.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11. 5 с.
 20. Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Исследовательский стенд электродинамического привода подачи инструмента // Решетневские чтения: материалы XIV Международ. науч. конф. (10-12 нояб. 2010 г.). Красноярск, 2010. Т. 1. С. 237-238.
- References*
1. Davydov A.D., Kozak E. High-speed electrochemical shaping. M.: Nauka, 1990. 272 p.
 2. Sedykin F.V. Dimensional electrochemical processing of machine parts. M.: Mashinostroenie, 1976. 302 p.
 3. SHvaleva N.A., Fadeev A.A. The dimensional electrochemical machining of parts of dies and molds // Reshetnevskie chteniya: materialy XXV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (10-12 noyab. 2021 g.). Krasnoyarsk, 2021. P. 277-278.
 4. Pratih Kumar M.R., Prakasan K., Kalajchelvan K. Experimental study and "multiphysical" modeling of electrochemical processing of holes with various electrodes // Russian Journal of Electrochemistry. 2016. V. 52. № 10. P. 1059-1072.
 5. Volgin V.M., Do V.D. Modeling of electrochemical processing with a wire electrode-tool: the influence of the tool movement speed on the cut geometry // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2014. № 7. P. 85-93.
 6. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode // Annals of the CIRP. 2007. V. 56 (1). P. 241-244.
 7. Slatineanu L., Dodun O., Santo O., Acoteata M., Munteanu A. Modelling of the of electrochemical machining process // IFAC MCPL. 2007. V. 40 (18). P. 475-480.
 8. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical dimensional processing of metals: the process of shaping // Russian Journal of Electrochemistry. 2004. V. 40. № 12. P. 1438-1480.
 9. Shirvani H., Shirvani A., Mirzaee I. Proc. II-nd Int. Conf. on Advances in Production Engineering. Part II. Warsaw. 2001. P. 343.
 10. Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B., Deconinck J. // J. Mater. Process. Technol. 2004. V. 149. P. 472.
 11. Bortels L., Purcar M., Van den Bossche B., Deconinck J. // J. Mater. Process. Technol. 2004. V. 149. P. 486.
 12. SHvaleva N.A., Stahnova M.V., Fadeev A.A., SHestakov I.YA. Parameters of the process of electrochemical machining of wafer background with a slit cathode tool // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: sb. materialov VII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (12-16 apr. 2021 g.). Krasnoyarsk, 2021. V. 1. P. 66-68.
 13. Karimov A.H., Klokov V.V., Filatov E.I. Methods for calculating electrochemical shaping. Kazan': Izd-vo Kazanskogo un-ta, 1990. 291 p.
 14. Qu Ningsong, Xu Kun, Zeng Yongbin, Zhu Di. Wire feeding micro electrochemical wire cutting process: pat. CN104475893A Kitaj, MPK B23H7/20. Priorities CN201410610757A. 2014-11-04; Publ. 2015-04-01. 5 p.
 15. Meng Lingchao, Zeng Yongbin, Zhu Di. Workpiece reciprocating motion micro-electrochemical linear cutting method: pat. CN107350584A Kitaj, MPK B23H7/06. Priorities CN201710568357A. 2017-07-13; Publ. 2017-11-17. 10 p.
 16. Gimaev N.Z., Sibagatullin ZH.H., Zajcev A.N. Rod electrode-tool: pat. № 2030261 C1 Ros. Federaciya, MPK B23H 7/22; zayavl. 19.12.1990; opubl. 10.03.1995.
 17. Moroz I.I., Alekseev G.A., Vodyanickij O.A. Electrochemical treatment of metals. M.: Mashinostroenie, 1969. 208 p.
 18. Smolencev G.P., Smolencev V.P. Cathode tool for dimensional electrochemical processing and method for its manufacture: pat. № 841891; zayavl. 10.04.79; opubl. 30.06.81.
 19. Stryuk A.I., SHestakov I.YA., Fadeev A.A. Electrodynamic tool feed drive: pat. 2274525 RF, MPK V23N 7/30; zayavl. 27.09.2004; opubl. 20.04.2006, Byul. № 11. 5 p.
 20. Fadeev A.A., SHestakov I.YA. Research stand for electrodynamic tool feed drive // Reshetnevskie chteniya: materialy XIV Mezhdunarod. nauch. konf. (10-12 noyab. 2010 g.). Krasnoyarsk, 2010. V. 1. P. 237-238.