



**ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
НА ТОЧНОСТЬ КОПИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА**

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор кафедры технологии маши-
ностроения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Григораш Владимир Васильевич,
к.т.н., доцент кафедры металлических и
деревянных конструкций, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж

Падурец Анна Александровна,
магистрант кафедры технологии машиностро-
ения, Воронежский государственный техниче-
ский университет, г. Воронеж.

✉¹ **Перова Алла Владимировна,**
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: pva7@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены возмож-
ные схемы электрохимического формообра-
зования инструмента гравюр штампов, пресс-
форм, литниковых форм и подобных деталей
методом копирования электрода-инструмента
на копировально-прошивочном оборудова-
нии. Экспериментальные исследования пока-
зали, что для изготовления деталей с точно-
стью 0,04-0,06 мм предпочтительной является
импульсно-циклическая схема электрохими-
ческой обработки с вибрирующим электро-
дом-инструментом.

**INFLUENCE OF ELECTROCHEMICAL
SHAPING METHODS FOR THE
ACCURACY OF COPYING THE
ELECTRODE-TOOL**

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of mechanical engineering technology,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of metal and wooden structures,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Padurets Anna Alexandrovna,
master's student of the department of mechanical
engineering technology, Voronezh state technical
university, Voronezh.

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna,**
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail pva7@mail.ru

Annotation. This article presents discusses possi-
ble schemes for electrochemical shaping of tool
engravings of stamps, molds, spigot molds and
similar parts by copying an electrode-tool on cop-
ying and stitching equipment. Experimental stud-
ies have shown that for the manufacture of parts
with an accuracy of 0.04-0.06 mm, a pulse-cyclic
electrochemical processing circuit with a vibrat-
ing tool electrode is preferable.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ, КОПИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА, ТОЧНОСТЬ КОПИРОВАНИЯ. **Keywords:** ELECTROCHEMICAL SHAPING, COPYING OF THE ELECTRODE-TOOL, ACCURACY OF COPYING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Теоретические и экспериментальные исследования по повышению точности электрохимического формообразования поверхностей токопроводящих деталей машин путем анодного растворения начались еще в СССР в 60-70-е годы прошлого века и ведутся еще до настоящего времени [1-7]. Результаты работ, выполненных в последние годы как в России, так и за рубежом, позволяют разделить все факторы, влияющие на точность электрохимического формообразования (ЭХФ) на две основные группы:

- не зависящие от процесса анодного растворения и режимных параметров обработки. Это систематические погрешности, обусловленные геометрическими неточностями оборудования, приспособлений и электродов-инструментов (ЭИ);
- зависящие от процесса анодного растворения и принятой для обработки схемы формообразования.

Наименьшую долю в суммарную погрешность обработки, как показали исследования [8], вносят собственно электрохимический станок и приспособление.

В данной работе предпринята попытка определения влияния схемы ЭХФ на точность, под которой будет пониматься точность копирования ЭИ. Анализ предварительных исследований показал, что точность копирования существенным образом зависит от особенностей локализации съема металла, которые имеют отличия в зависимости от применяемой схемы формообразования. Кроме того, погрешность копирования зависит от геометрической формы детали, величины и неравномерности припуска на обработку.

2 Материалы и методы

Известно [9, 10], что степень локализации при постоянном выходе металла по току определяется величинами межэлектродных зазоров (МЭЗ) в точках, находящихся на различных расстояниях от ЭИ. Откуда следует, что при обработке на малых МЭЗ возможно достижение более высокой точности формообразования, т.к. это приводит к увеличению степени локализации. Однако при уменьшении МЭЗ ухудшаются условия эвакуации продуктов электрохимических реакций и, прежде всего, газообразных продуктов. Наиболее важным фактором при этом является расстояние между входом и выходом электролита из МЭЗ. В тех случаях, когда это расстояние невелико, то газонаполнение МЭЗ не успевает достигнуть больших величин и электрохимическая обработка (ЭХО) на малых зазорах реализуется достаточно легко. Но ЭХО на постоянном токе на малых МЭЗ при увеличении обрабатываемой площади детали не представляется возможной вследствие сильного газонаполнения. Для устранения этого эффекта рекомендуется применять импульсный ток [11], а для восстановления свойств электролита в МЭЗ – уменьшать длительность импульса и увеличивать длительность паузы.

Устойчивая работа на малых МЭЗ возможна при использовании импульсно-циклических схем ЭХО. Достижение высокой точности копирования на малых МЭЗ возможно при применении прецизионного электрохимического копировально-прошивочного оборудования, работающего в непрерывном режиме. Хорошие стабильные результаты достигнуты при эксплуатации зарубежного оборудования: на станках фирмы «Charmilles» (Швейцария) изготавливались гравюры штампов под лопатку с длиной пера 300 мм с точностью по профилю 0,04-0,06 мм и 0,1 мм в замковой части; на станках фирмы «Hitachi» (Япония), использовавшихся в автомобилестроении, достигнута точность изготовления штампов в пределах 0,1 мм. При

использовании отечественного оборудования высокая точность ЭХФ копированием зачастую не достигалась.

Оборудованию для ЭХФ, работающему на импульсно-циклических схемах, необходимы такие же жесткие, повышенной точности конструкции и прецизионные привода подачи ЭИ с системами управления, автоматической стабилизации температуры, водородного показателя и гидродинамического режима течения электролита. Кроме того, для реализации вышеуказанного процесса ЭХФ потребуется довольно сложный источник импульсного технологического напряжения с регулируемыми параметрами импульсов. Отечественное оборудование не нашло широкого применения вследствие того, что конструкции станков были недостаточно точны и надежны в работе.

Поэтому были начаты работы по изысканию новых схем ЭХФ. Анализ импульсно-циклических схем формообразования показал, что среди этих схем есть такие, которые при высокой точности копирования не требуют вложения больших средств на реализацию и даже при наличии станков средней точности с непрерывной подачей ЭИ позволяют их модернизировать в станки повышенной точности.

Одной из первых разработок циклических схем явился способ формообразования с «ощупыванием» [12], по которому ЭИ посредством механизма подачи движется до касания с обрабатываемой деталью и отходит на рабочий зазор, после чего включается ток. В процессе анодного растворения припуска ЭИ перемещается по направлению к детали с постоянной скоростью. Период между «ощупыванием» ранее составлял 15-20 с. Снижение этого периода способствует повышению точности ЭХФ; в настоящее время период между «ощупыванием» составляет 1,5-2 с.

Создание таких способов ЭХФ и их дальнейшее совершенствование явилось существенным шагом вперед по сравнению с непрерывной схемой, особенно в связи с отсутствием систем защиты электродов от коротких замыканий. С их помощью решались задачи повышения надежности и стабильности работы оборудования, самого процесса и точности ЭХФ. Импульсно-циклическая схема формообразования получила дальнейшее развитие, когда началось ее осуществление с импульсным током.

Исследования ученых электрохимической школы Тульского политехнического института внесли существенный вклад в развитие импульсно-циклической схемы ЭХО. Повышение точности ЭХФ в способе [13] достигалось за счет того, что процесс анодного растворения осуществлялся при рабочем движении ЭИ от обрабатываемой детали при совмещении моментов подачи импульсов технологического напряжения с минимальным МЭЗ. Процесс ЭХО состоял из ряда последовательных циклов и велся в практически неподвижном электролите вследствие малости МЭЗ. Такие условия способствовали существенному повышению точности копирования при ЭХФ.

Ими же предложена импульсно-циклическая схема ЭХФ с регулированием режима течения электролита в МЭЗ: ламинарном в рабочем интервале при малых МЭЗ и турбулентном в интервале промывки. Ими также была предложена самоподстраивающаяся схема ЭХО, в которой система программно-адаптивного управления обеспечивала возможность работы как в непрерывном, так и в импульсно-циклическом режимах. В обоих режимах движение ЭИ осуществлялось посредством безынерционного привода подачи.

Очередным этапом повышения точности ЭХФ явилось появление обработки по схеме с вибрирующим ЭИ [14]. Высокая точность копирования ЭИ достигалась путем придания инструменту в процессе обработки колебательных движений в направлении подачи, синхронизированных с импульсами технологического напряжения, при этом осуществлялось чередование постоянной подачи и колебаний ЭИ. Процесс ЭХО протекал с периодическими чередованиями уменьшающегося и увеличивающегося МЭЗ в заданных пределах: наименьший гарантировался устройством, сообщаящим ЭИ вибрацию, наибольший – продолжительностью цикла обработки с подачей ЭИ.

Известны схемы ЭХФ, основанные на переменной гидродинамике потока электролита. В работе [14] описана ЭХО, в которой цикл обработки был разделен на два этапа: анодное растворение в неподвижном электролите и удаление продуктов растворения движущимся

электролитом при отключенном токе. Обработка в условиях квазинеповерхностного электролита всегда имеет место в системах с вибрацией ЭИ и импульсами напряжения малой длительности. При подаче импульса, когда МЭЗ менее 0,1 мм, выделяющийся в результате электрохимических реакций газ практически запирает его. При этом достигаются условия копирования ЭИ с достаточно высокой точностью.

В ряде случаев вибрация ЭИ осуществлялась посредством гидравлических ударов электролита, поступавшего в МЭЗ. Источник питания включался при достижении заранее установленного МЭЗ и оставался включенным до следующего касания ЭИ с обрабатываемой деталью. Процесс обработки реализовывался на разных МЭЗ, его варьирование осуществлялось за счет изменения силы гидравлического удара.

Анализ схем импульсно-циклической обработки показал, что для их реализации необходимы стабилизированные приводы подачи ЭИ, оснащенные регуляторами, системами адаптивно-программного управления и т.п., что естественно усложняет управление процессом, снижает надежность и существенно повышает стоимость оборудования.

3 Результаты исследований

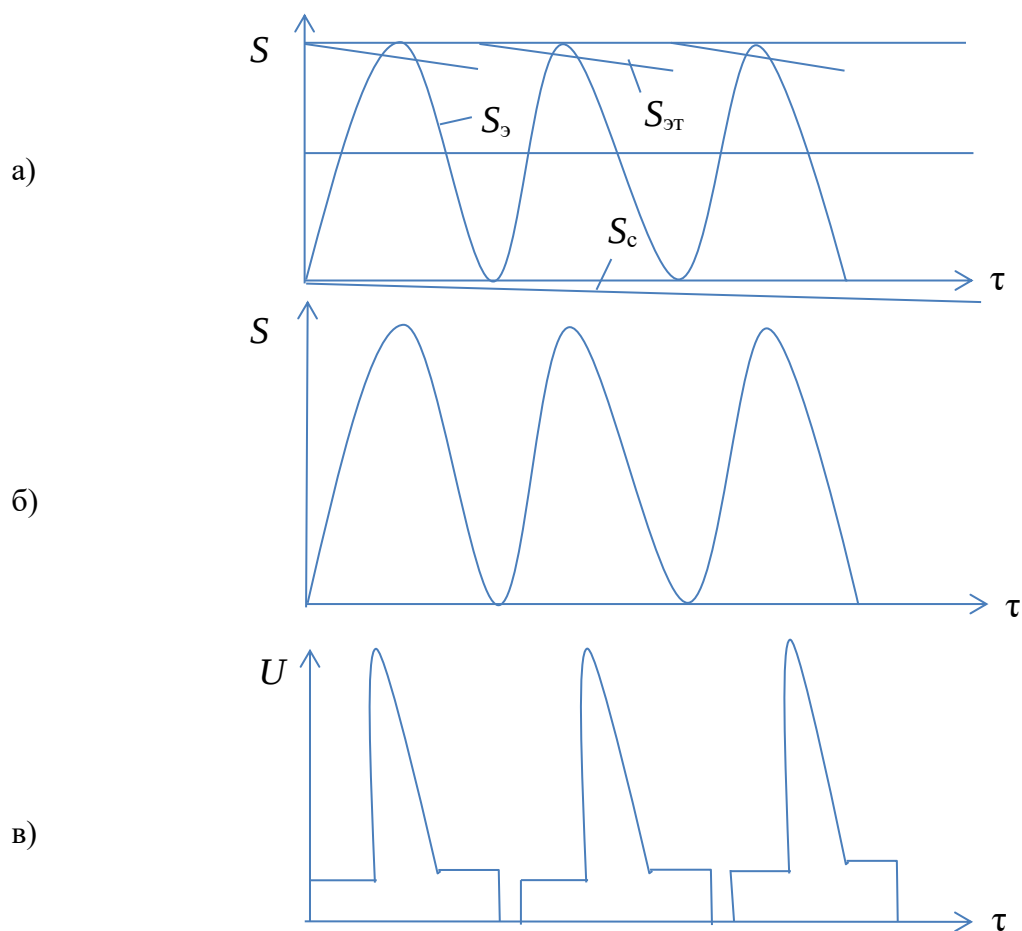
Учеными Ивановского государственного химико-технологического университета разработана схема ЭХФ [15], сочетающая преимущества импульсно-циклической схемы со сложной кинематикой движения ЭИ и схемы импульсной обработки с вибрацией ЭИ, которая была реализована совместными работами ученых Ивановского государственного химико-технологического университета, сотрудников Воронежского государственного университета с помощью специалистов Воронежского механического завода в опытной промышленной установке.

Такой принцип действия системы регулирования МЭЗ представлен на рис. 1. Под воздействием вибратора ЭИ совершает периодические колебания, касаясь каждые полпериода поверхности детали. После касания ЭИ его перемещение складывается из перемещения вверх под действием вибратора и вниз под действием силы тяжести. Формирование МЭЗ осуществляется за счет результирующего перемещения ЭИ относительно обрабатываемой поверхности.

При формообразовании сложнопрофильных деталей с изменением площади обрабатываемой поверхности возможна дестабилизация процесса обработки, которая может привести либо к значительному увеличению МЭЗ, либо к короткому замыканию. Устойчивость процесса ЭХФ в данном случае достигается автоматическим регулированием равновесия в МЭЗ путем компенсации противодействия. Система регулирования, включающая в себя датчик касания 3 усилитель 4 и исполнительный механизм 5, соединенный гибкой связью 6 с подвижной электродной системой, приведена на рис. 2.

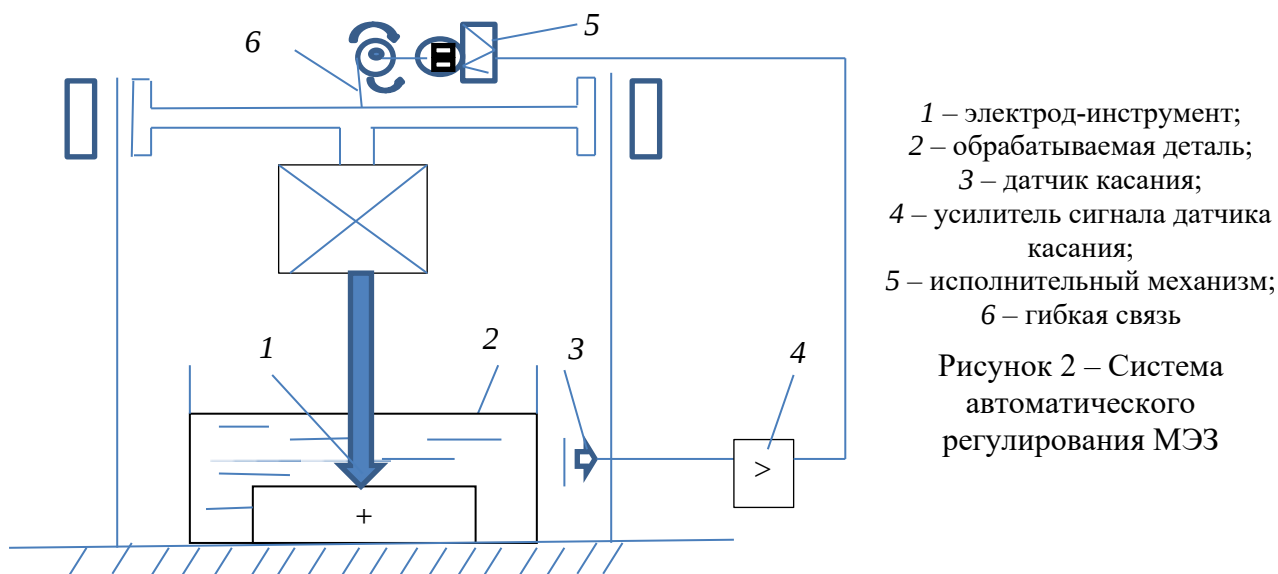
Электродная система работает следующим образом. При прекращении касаний ЭИ 1 и детали 2 по мере растворения припуска в продолжение нескольких циклов (количество циклов определяется по нечувствительности датчика касаний 3) механизм 5 ослабляет гибкую связь 6 до тех пор, пока ЭИ, перемещающийся под действием силы тяжести, не коснется поверхности детали 2. После чего исполнительный механизм 5 останавливается. Обработка осуществляется на МЭЗ, равном удвоенной амплитуде вибрации ЭИ 1. Такая система регулирования позволяет вывести ЭИ на заданный МЭЗ и компенсировать противодействие в МЭЗ путем нагружения ЭИ. При этом анодное растворение продолжается до прекращения касаний ЭИ с поверхностью детали.

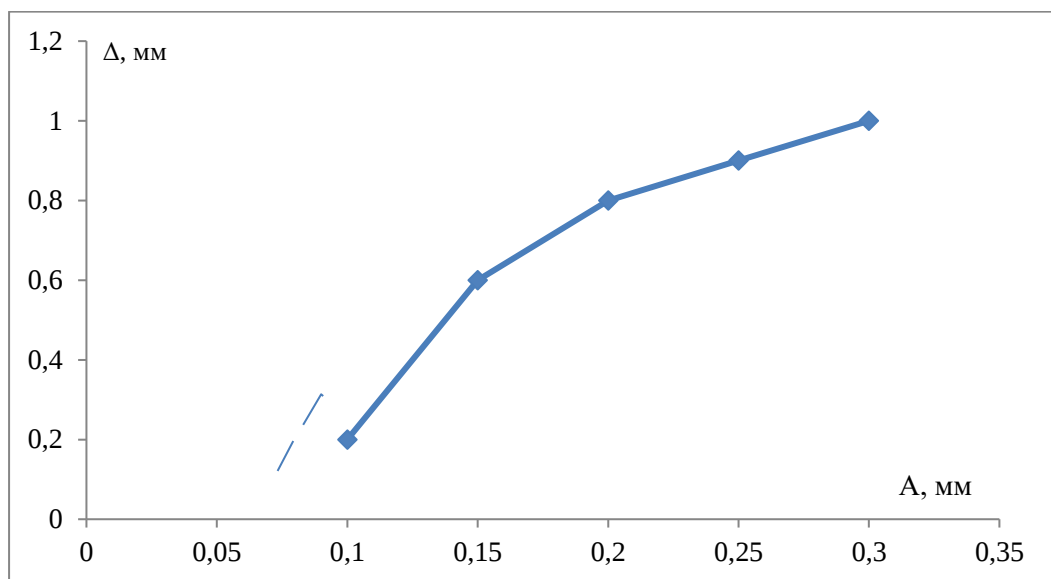
Результаты экспериментальных исследований показали, что производительность процесса зависела от амплитуды вибрации и изменялась по закону, близкому к гиперболическому. Погрешность формы линейно возрастала с ростом амплитуды вибрации. При этом зависимость погрешности размера от амплитуды вибрации A была нелинейна. Экстраполяция кривой на нулевое значение погрешности размера Δ дала величину амплитуды вибрации 0,07 мм (рис. 3).



- а) за счет электрохимического съема ($S_{\text{с}}$);
 б) суммарная величина изменения МЭЗ (S) от воздействия всех факторов;
 в) от импульсного технологического напряжения (U);
 $S_{\text{ЭВ}}$ – перемещение ЭИ под действием вибратора;
 $S_{\text{ЭТ}}$ – перемещение электродной системы под действием силы тяжести

Рисунок 1 – Зависимость перемещения ЭИ





рабочее напряжение – 5 В; скважность – 1,5

Рисунок 3 – Зависимость погрешности размера Δ от амплитуды вибрации A

ЭХФ наиболее эффективно при напряжении 2-4 В как на стальных, так и на титановых образцах [16]. Энергоемкость растворения титановых сплавов в электролитах различного состава составляла 30-100 кВт/кг. Вибрация электродов ее существенно снижала: в растворе электролита 15 % NaNO_3 + 3 % NaCl энергоемкость составляла 21 кВт/кг, в растворе электролита 15 % NaNO_3 + 3 % LiCl – 19 кВт/кг. Скорее всего вибрация электродов приводила к изменению условий формирования и свойств поверхностных титановых пленок.

Эксперименты по сравнению точности копирования ЭИ при ЭХО в непрерывном режиме при постоянном токе и постоянной подаче ЭИ проводились на образцах, изготовленных из инструментальной штамповой стали 3Х2В8 (ГОСТ 1050-2013). Обработка осуществлялась неизолрованными ЭИ цилиндрической (диаметрами 10 и 15 мм) и конической (с углами наклона образующей 15° и 30°) формы без противодавления. Электролитом являлся 15 % раствор NaNO_3 при температуре 20° С [17]. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1, откуда видно, что во всех случаях использования схемы с вибрацией точность ЭХФ была выше.

Таблица – Размеры цилиндрических и конических отверстий в зависимости от схемы обработки

Глубина обработки, мм	Цилиндрические ЭИ				Конические ЭИ			
	диаметр 10 мм		диаметр 15 мм		угол наклона 15°		угол наклона 30°	
	1	2	1	2	1	2	1	2
5	10,17	10,55	15,25	15,65	11,80	12,55	18,20	18,45
10	10,05	10,35	15,10	15,40	9,05	9,40	13,00	13,15

Примечание: 1 – формообразование с вибрацией ЭИ; 2 – непрерывное формообразование.

4 Обсуждение и заключение

Реализация рассмотренного процесса ЭХФ в производстве возможна при разработке и промышленном изготовлении специальных виброприставок, закрепляющихся на пиноли любого копировально-прошивочного электрохимического станка. Приставки отличаются простотой конструкции и удобством обслуживания.

Таким образом, без значительных затрат на замену приводов подачи, изготовление сложных систем адаптивного и программного управления, импульсных источников питания любой

электрохимический станок может быть переоборудован в станок повышенной точности. Наличие приставки, установленной на шпинделе станка, обеспечит копирование ЭИ при формообразовании гравюр штампов, пресс-форм, литниковых форм и подобных деталей с точностью 0,04-0,06 мм. Высокая точность копирования ЭИ не предполагает дополнительных мероприятий по расчету его геометрии и корректировке для получения нужных размеров. В комплекте с электрохимическими копировально-прошивочными станками приставка может найти применение на машиностроительных предприятиях для формообразования деталей сложной формы из высокопрочных и конструкционных материалов основного и инструментального производства.

Список литературы

- 1 Журавский, А. К. О структуре точности ЭХО деталей // Новое в электрохимической размерной обработке металлов: материалы научно - технической конференции. Кишинев: Штиинца, 1972. – С. 74-78.
- 2 Кашеев, В.Д. Влияние различных видов электрохимической обработки на точность и шероховатость поверхности металла // Электродные процессы и технология электрохимической размерной обработки: сборник статей / под общей редакцией Ю.Н. Петрова. Кишинев: Штиинца, 1980. – С. 14-20.
- 3 Santos E., Schmickler W. Catalysis in Electrochemistry. From Fundamentals to Strategies for Fuel Cell Development. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2011. 516 p.
- 4 Wendt H., Kreysa G. The Scope and History of Electrochemical Engineering // Electrochemical Engineering. 1999. № 4. P. 1-7.
- 5 Stankovic V. Electrochemical Engineering – its appearance, evolution and present status. Approaching an anniversary // Journal of Electrochemical Science and Engineering. 2012. № 2. P. 1-14.
- 6 Bebelis S., Bouzek K., Cornell A., Ferreira M. G. S., Kelsall G. H., Lapicque F., Ponce de León C., Rodrigo M. A., Walsh F. C. Highlights during the development of electrochemical engineering // Chemical Engineering Research and Design. 2013. № 91(10). P. 1998-2020.
- 7 Hawkins W. A. Electrochemical turning adds a new dimension // Metalworking Production. 2018. V. 114. № 12. P. 49-51.
- 8 Болдырев, А. И. Погрешности и их влияние на формирование точности электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, А.А. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 116-122.
- 9 Саушкин, Б. П., Проблемы и перспективы развития импульсной электрохимической размерной обработки / Б.П. Саушкин, А.Г. Атанасянц, Г. А. Сычков // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 2. – С. 10-22.
- 10 Болдырев, А.И. Влияние электрохимической обработки на состояние поверхностного слоя штамповой оснастки / А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, А. В. Перова, А. А. Падурец // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – № 3 (41). – С. 18-23.
- 11 Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61. – № 3. – С. 246-257.
- 12 Саушкин Б. П. Проектирование технологий электрохимической обработки деталей авиационной техники. М.: Машиностроение, 2008. – 400 с.
- 13 Житников В. П., Зайцев А.Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. – 413 с.
- 14 Зайцев, А.Н. Электрохимическая обработка. Теория, технология, оборудование: учебное пособие. М.-Вологда: Инфро-Инженерия, 2024. – 636 с.
- 15 Бурков, В. М. Электрохимическое формообразование с вибрацией электрода-инструмента. Иваново: Ивановский государственный. химико-технологический университет, 2008. – 159 с.
- 16 Болдырев А. И., Болдырев А. А., Григоращ В. В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.В. Григоращ // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 98-104.
- 17 Болдырев, А. А. Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин / А. А. Болдырев, А. И. Болдырев, А. В. Мандрыкин, А. В. Перова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. – Т. 13. – № 2. – С. 107-113.

18 Болдырев, А. И. Формализация напряженно-деформированного состояния детали с подвижной границей в условиях электрического и комбинированного формообразования / А. И. Болдырев, С. В. Усов, А. А. Болдырев, В. А. Нилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 16-19.

References

- 1 Zhuravskii, A.K. On the structure of the accuracy of ECHO parts // New in electrochemical dimensional processing of metals: materials of the scientific and technical conference. Chisinau: Shtiintsa, 1972. – P. 74-78.
- 2 Kashcheev, V.D. Influence of various types of electrochemical processing on the accuracy and roughness of the metal surface // Electrode processes and technology of electrochemical dimensional processing: collection of articles / edited by Yu.N. Petrov. Chisinau: Shtiintsa, 1980. – P. 14-20.
- 3 Santos E., Schmickler W. Catalysis in Electrochemistry. From Fundamentals to Strategies for Fuel Cell Development. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2011. 516 p.
- 4 Wendt H., Kreysa G. The Scope and History of Electrochemical Engineering // Electrochemical Engineering. 1999. No. 4. P. 1-7.
- 5 Stankovic V. Electrochemical Engineering – its appearance, evolution and present status. Approaching an anniversary // Journal of Electrochemical Science and Engineering. 2012. No. 2. P. 1-14.
- 6 Bebelis S., Bouzek K., Cornell A., Ferreira M. G. S., Kelsall G. H., Lapique F., Ponce de León C., Rodrigo M. A., Walsh F. C. Highlights during the development of electrochemical engineering // Chemical Engineering Research and Design. 2013. No. 91(10). P. 1998-2020.
- 7 Hawkins W. A. Electrochemical turning adds a new dimension // Metalworking Production. 2018. V. 114. No. 12. P. 49-51.
- 8 Boldyrev, A. I. Errors and their influence on the formation of the accuracy of electrochemical shaping / A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev // Bulletin of the Voronezh State Technical University. - 2017. - Vol. 13. - No. 3. - P. 116-122.
- 9 Saushkin, B. P., Problems and prospects for the development of pulsed electrochemical dimensional processing / B. P. Saushkin, A. G. Atanasyants, G. A. Sychkov // Electronic processing of materials. - 2003. - No. 2. - P. 10-22.
- 10 Boldyrev, A. I. The influence of electrochemical machining on the state of the surface layer of stamping tooling / A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev, A. V. Perova, A. A. Padurets // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - No. 3 (41). - P. 18-23.
- 11 Power source for studying pulsed electrochemical processes / Yu. G. Alekseev [et al.] // Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. - 2018. - V. 61. - No. 3. - P. 246-257.
- 12 Saushkin B. P. Design of technologies for electrochemical machining of aircraft parts. Moscow: Mechanical Engineering, 2008. - 400 p.
- 13 Zhitnikov V. P., Zaitsev A. N. Pulse electrochemical dimensional machining. M.: Mashinostroenie, 2008. – 413 p.
- 14 Zaitsev, A. N. Electrochemical processing. Theory, technology, equipment: study guide. M.-Vologda: Info-Engineering, 2024. – 636 p.
- 15 Burkov, V. M. Electrochemical shaping with vibration of the electrode-tool. Ivanovo: Ivanovo State. Chemical-Technological University, 2008. – 159 p.
- 16 Boldyrev A. I., Boldyrev A. A., Grigorash V. V. Influence of the process parameters of anodic dissolution on ensuring the quality of electrochemical shaping / A. I. Boldyrev, A. A. Boldyrev, V. V. Grigorash // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2017. - Vol. 13. - No. 4. - P. 98-104.
- 17 Boldyrev, A. A. Optimization of technological processes of electrochemical processing of machine parts / A. A. Boldyrev, A. I. Boldyrev, A. V. Mandrykin, A. V. Perova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2017. - Vol. 13. - No. 2. - P. 107-113.
- 18 Boldyrev, A. I. Formalization of the stress-strain state of a part with a moving boundary under conditions of electrical and combined forming / A. I. Boldyrev, S. V. Usov, A. A. Boldyrev, V. A. Nilov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2014. – Т. 10. – No. 1. – P. 16-19.

© Болдырев А. А., Болдырев А. И., Григораш В. В., Падурец А. А., Перова А. В., 2025