

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЦИКЛОИДАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЩЕЛЕВЫХ СТРУКТУР
НА ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВКАХ И ЗАГОТОВКАХ
ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

И.Д. Тетюшин

tetyushinid@student.bmstu.ru

SPIN-код: 6633-3479

К.М. Каудерер

costes115@gmail.com

SPIN-код: 5602-0686

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен перспективный метод циклоидального электрохимического формообразования дискретно-целевых структур на тонкостенных заготовках и заготовках из труднообрабатываемых материалов. Представлена схема формирования межэлектродного зазора и приведена обобщенная векторная модель технологической компоновки. Проведена векторная формализация технологической компоновки для внешней схемы циклоидальной электрохимической обработки. Разработана модель технологического оборудования для циклоидального электрохимического формообразования. Представлены траектории перемещения вершины электрода в относительном движении при встречном и попутном циклоидальном электрохимическом формообразовании. Разработана кинематическая структура формообразования способов обработки с циклоидальным электрохимическим формообразованием в общем виде и приведена структурная формула кинематики формообразования.

Ключевые слова

Циклоидальное электрохимическое формообразование, дискретно-целевые структуры, комбинированные методы обработки, бироторная обработка, электрохимия, специальные методы обработки, размерная электрохимическая обработка, технологическая система

Поступила в редакцию 17.02.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Рост возможностей отрасли машиностроения связан с процессом механической обработки материалов, для которых обработка резанием в ряде случаев представляется крайне затруднительной. Из-за значительных усилий, прилагаемых для механообработки, требуются высокие силы резания и возникают сильные вибрации, снижающие срок эксплуатации режущего инструмента, а также область резания сильно перегревается и требует дополнительного охлаждения. Использование таких материалов важно для производства деталей, поскольку позволяет значительно повысить срок их службы и надежность.

Наибольшей эффективностью при резании труднообрабатываемых материалов обладают комбинированные методы. Они позволяют достичь новых тех-

нических эффектов, определяющих значительное увеличение эксплуатационных параметров деталей. Существующие технологические системы с циклоидальной схемой формообразования обеспечивают лучшие технические характеристики изделий с дискретно-щелевой структурой и технико-экономические показатели процесса их получения. Увеличение плотности расположения щелей способствует увеличению проницаемости и повышению тонкости фильтрации в системах очистки воды, нефти и газа; приводит к росту теплопередачи в теплообменниках и увеличению площади поверхности сцепления при подготовке изделий к нанесению покрытия. Кроме того, обеспечивается возможность получения изделий в виде монодетали вместо сборочной единицы, что существенно сокращает трудозатраты на их изготовление. В данной работе предложено использовать метод циклоидального электрохимического формообразования. Актуальность применения данного метода обусловлена возможностью обрабатывать тонкостенные заготовки и заготовки из труднообрабатываемых материалов, получать оребренные валы, радиаторы, дискретно-щелевые структуры, канавки, фигурные валки. Примеры подобных деталей изображены на рис.1.



Рис. 1. Детали, изготавливаемые методом циклоидального электрохимического формообразования:

а — фильтрующие элементы; *б* — оребренные трубы теплообменников; *в* — фигурные валки;
г — плунжеры и валы с оребрением под покрытие; *д* — радиатор

При циклоидальном формообразовании траектория движения точки, фиксированной на вращающемся объекте в координатах, которые связаны с другим вращающимся объектом, представляет собой трохоиду (общее название циклоидальной кривой) [1–4].

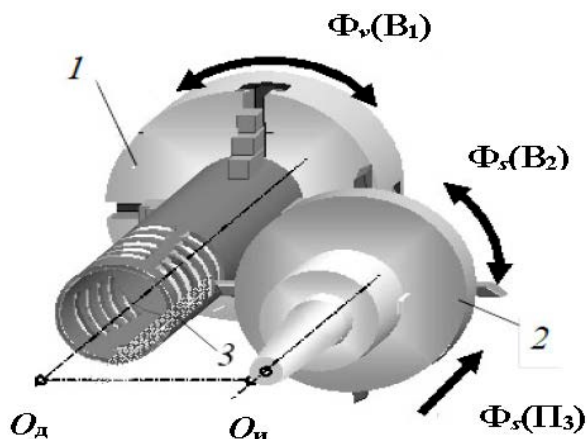


Рис. 2. Схема формирования межэлектродного зазора и соответствующая технологическая компоновка исполнительных блоков относительно зоны обработки:

1 — патрон; 2 — инструмент; 3 — заготовка

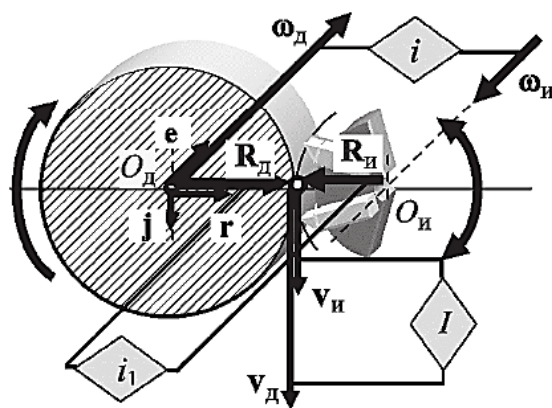


Рис. 3. Векторная формализация технологической компоновки для внешней схемы обработки

Кинематическая структура формообразования способов обработки с циклоидальным электрохимическим формообразованием в общем виде содержит два вращательных и одно поступательное движение, распределенные по элементам пары деталь — инструмент, и может быть отражена структурной формулой $\Phi_v(B_1)$, $\Phi_s(B_2)$, $\Phi_s(\Pi_3)$ (рис. 2). Формула отражает принадлежность элементарных движений к процессу формообразования Φ , вид движения обозначается символом B (вращательное) или Π (поступательное); принадлежность движения к главному, определяющему скорость резания, обозначено индексом v , принад-

лежность к движению подачи — индексом s ; номер движения соответствует числовому индексу.

Для унифицированного описания законов формообразования для приведенной схемы обработки формализуем технологическую компоновку в виде системы векторов с помощью методов векторной алгебры [4, 5]. Для этого использована полярная система координат с центром детали O_d (рис. 3). Выбор системы определяется формой обрабатываемой поверхности и вращательным типом доминирующих движений $\Phi_v(B_1)$, $\Phi_s(B_2)$.

Обобщенная векторная модель технологической компоновки показана на рис. 3. Модель характеризуется тремя ортогональными парами векторов детали и инструмента \mathbf{R}_d – $\mathbf{R}_и$, $\boldsymbol{\omega}_d$ – $\boldsymbol{\omega}_и$, \mathbf{V}_d – $\mathbf{V}_и$, построенными в координатной системе с единичными векторами r , e , j , и передаточными отношениями i_1 , i , I . При попарной коллинеарности векторов в полюсе подхода электрода-инструмента P соотношение вращений шпинделей детали и инструмента можно представить кинематическими передаточными отношениями координат векторов угловых i и окружных I скоростей:

$$i = \boldsymbol{\omega}_d / \boldsymbol{\omega}_и;$$

где $\boldsymbol{\omega}_d$ — окружная скорость детали; $\boldsymbol{\omega}_и$ — окружная скорость инструмента;

$$I = i_1 / i.$$

Окружные скорости детали и инструмента определяются векторными произведениями:

$$\mathbf{V}_d = \boldsymbol{\omega}_d \times \mathbf{R}_d;$$

$$\mathbf{V}_и = \boldsymbol{\omega}_и \times \mathbf{R}_и,$$

где \mathbf{R}_d — радиус детали; $\mathbf{R}_и$ — радиус инструмента.

Электрохимическая обработка металлов — способ обработки, предназначенный для придания деталям определенной формы, нужных размеров или свойств шероховатости. Осуществляется в электролизерах (электролитических ваннах, электрохимических ячейках специальных станков, установок). Электрохимические методы обработки металлов основаны на принципе электролиза. Известно, что при введении в сосуд с токопроводящей жидкостью твердых проводящих пластинок (электродов) и подаче на них напряжения возникает электрический ток. Такие токопроводящие жидкости называют проводниками II рода, или электролитами. Они представляют собой растворы кислот, щелочей и солей в воде или в других растворителях, а также расплавы солей. Носителями тока в электролитах служат положительные и отрицательные ионы, которые движутся соответственно к отрицательному электроду — катоду и положительному электроду — аноду. В зависимости от химической природы электролита и электродов, а также от напряжения на металлическом катоде обычно выделяется водород, на аноде происходит растворение металла, которое часто сопровождается выделением кислорода.

Описание метода. Обработка происходит в ванне, в растворе электролита установлены инструмент и заготовка [1, 6]. Инструмент осуществляет поступательное движение, а заготовка — и поступательное, и вращательное. В качестве инструмента представлен сборный электрод-инструмент. Для обеспечения метода выбрана вертикальная компоновка [5, 7]. Модель оборудования с вертикальной компоновкой представлена на рис. 4.

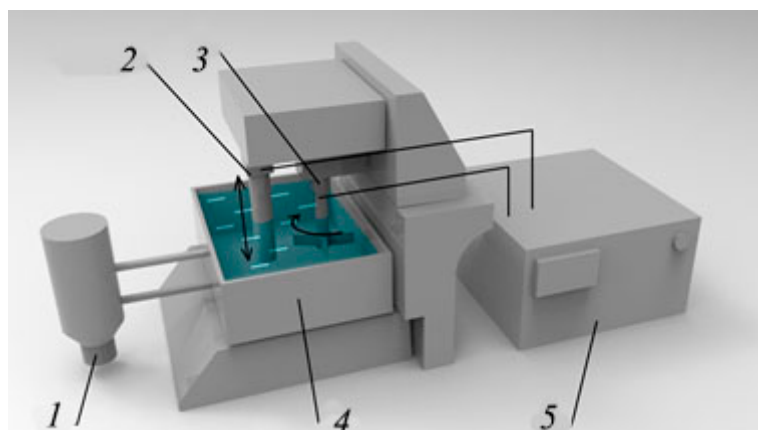


Рис. 4. Модель технологического оборудования для циклоидального электрохимического формообразования:

1 — устройство охлаждения, регенерации и подачи электролита; 2 — заготовка; 3 — инструмент; 4 — ванна с электролитом; 5 — источник тока

При циклоидальной электрохимической схеме обработки требуется обеспечить надежный подвод технологического тока и учесть условия его протекания при обработке [8]. Современные источники питания позволяют создать режимы с высокой плотностью тока (до 40...60 А/см²). Это не вызывает сложности, если обрабатываются небольшие площади и подводимый ток не приводит к нагреву контактных поверхностей до температуры выше 310...320 К [2, 9]. Значение постоянного технологического тока I_T зависит от его плотности:

$$I_T = \frac{F_0 \chi (U - \Delta U)}{S},$$

где F_0 — площадь обрабатываемой поверхности; χ — удельная проводимость электролита; U — напряжение на электродах; ΔU — потери напряжения в межэлектродном пространстве; S — межэлектродный зазор.

При использовании импульсного источника питания технологический ток снижается за счет скважности q :

$$I_{T,и} = \frac{1}{q} \frac{F_0 \chi (U - \Delta U)}{S}.$$

Значение q составляет 1,1...1,3.

Предельные размеры рабочей части электрода-инструмента зависят от возможности подведения к заготовке технологического тока [7, 8, 10]. Геометрические размеры контактных участков определяются формой ответных элементов поверхности заготовки, а минимальную площадь контакта рассчитывают из условия длительного подвода [9, 10] тока без перегрева токоподводов [2]. Значения плотности предельного тока, пропускаемого через токоподвод при различных способах охлаждения для различных материалов контактных деталей, приведены в таблице.

Значения плотности предельного тока

Способ охлаждения	Плотность тока, А/мм ² , для материала контактной детали токоподвода			
	Медные сплавы	Алюминиевые сплавы	Сталь	Свинец
Без охлаждения	1–2	0,8–1,5	0,3–0,4	0,1–0,2
Охлаждение струей воздуха	2–3	1,5–3,0	0,4–0,7	0–0,7
Охлаждение протекающей водой	3–6	2–3	0,7–1,2	0,5–0,7

Траектория формообразования будет зависеть от взаимной направленности движений электрода и инструмента [3], как показано на рис. 5.

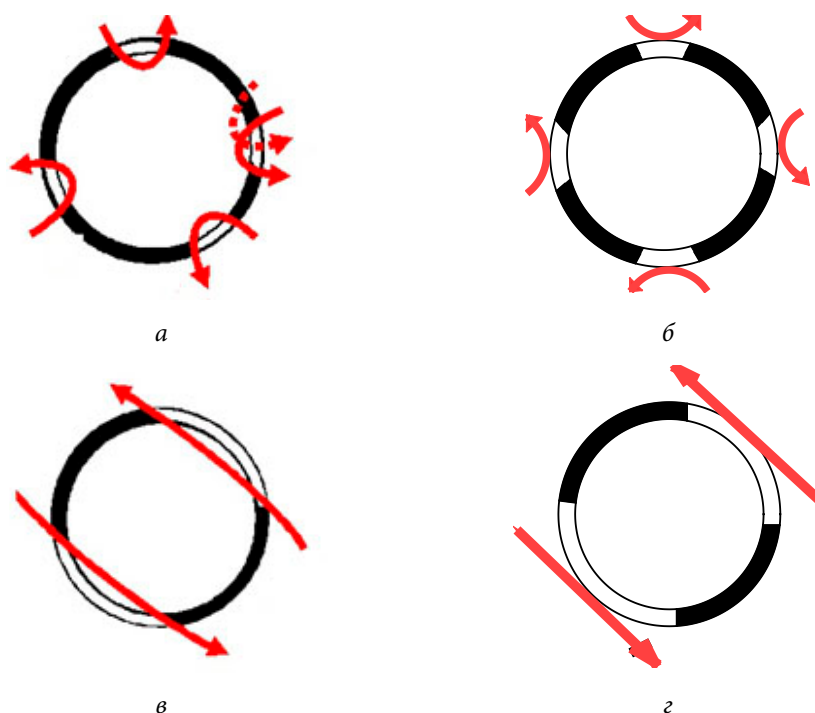


Рис. 5. Траектория формообразования:
a, б — попутное формообразование; *в, г* — встречное

Выводы. Реализация метода циклоидального электрохимического формообразования предлагает принципиально новый подход получения поверхностей с дискретно-щелевой структурой на тонкостенных заготовках из труднообрабатываемых материалов, в том числе из алюминия и титана. Предложенная схема обработки представляет собой принципиально новый метод изготовления деталей высокой сложности в различных отраслях промышленности от нефтегазовой до аэрокосмической. Технологическая система позволяет добиться более высоких характеристик деталей и технико-экономических показателей технологического процесса обработки. Помимо этого появляется возможность получения готовой монодетали без каких-либо сборочных узлов, что сокращает время и ресурсные затраты на изготовление, улучшает технологические характеристики и упрощает процесс изготовления. К преимуществам метода также относятся отсутствие износа и возможности поломки инструмента, его недостатками являются малая изученность процесса и отсутствие серьезных научных работ по данной тематике.

Литература

- [1] Чернянский П.М., ред. Проектирование автоматизированных станков и комплексов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [2] Смоленцев В.П., Осеков А.Н., Поташников М.Г. Расчет режимов и проектирование технологической оснастки для электрохимической обработки крупногабаритных деталей. *Вестник ВГТУ*, 2011, № 4, с. 51–54.
- [3] Иванов Д.В. Критериальная оценка технологической компоновки металлорежущих станков с циклоидальной схемой формообразования деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 2, с. 39–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-2-39-49>
- [4] Иванов В.С., Иванов Д.В. Векторный анализ методов лезвийной обработки деталей. *Технология машиностроения*, 2010, № 4, с. 8–13.
- [5] Иванов В.С., Иванов Д.В. Анализ компоновок бироторных станков для лезвийной обработки круглопрофильных деталей с дискретно-щелевой структурой поверхности. *Технология машиностроения*, 2012, № 7, с. 14–20.
- [6] Иванов Д.В. Электрохимическая обработка машиностроительных деталей. В: *Студенческий вестник МГТУ им. Баумана*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, с. 42–49.
- [7] Шестаков И.Я., Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С. Возможности применения электрохимической размерной обработки вращающимся катодом-инструментом для деталей летательных аппаратов. *Вестник СибГАУ*, 2017, т. 18, № 1, с. 227–231.
- [8] Орлов В.Ф., Чугунов Б.И. Электрохимическое формообразование. М., Машиностроение, 1990.
- [9] Щербак Г.А., Трифанов И.В., Трифанова Л.И. Моделирование процесса электрохимической размерной обработки катодом, совершающим колебательное и вибрационное движения. *Вестник СибГАУ*, 2005, № 3, с. 262–265.
- [10] Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораш В.В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования. *Вестник ВГТУ*, 2017, т. 13, № 4, с. 98–104.

Иван Дмитриевич Тетюшин — студент кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Константин Максимович Каудерер — студент кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Иванов Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тетюшин К.М., Каудерер К.М. Использование метода циклоидального электрохимического формообразования для изготовления щелевых структур на тонкостенных заготовках и заготовках из труднообрабатываемых материалов. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 03(68). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-03-780>

USE OF CYCLOIDAL ELECTROCHEMICAL SHAPING FOR MANUFACTURING SLOT STRUCTURES ON THIN-WALLED WORKPIECES AND WORKPIECES MADE OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS

I.D. Tetyushin

tetyushinid@student.bmstu.ru

SPIN-code: 6633-3479

K.M. Kauderer

costes115@gmail.com

SPIN-code: 5602-0686

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The advanced method of cycloidal electrochemical shaping of discrete-slot structures on thin-walled workpieces and workpieces made of hard-to-machine materials is considered. The scheme of interelectrode gap formation is presented, and a generalized vector model of the technological layout is provided. Vector formalization of technological layout for external circuit of cycloidal electrochemical treatment is carried out. The model of technological equipment for cycloidal electrochemical shaping is developed. Trajectories of the electrode tip moving in relative motion during counter and parallel cycloidal electrochemical shaping are presented. The kinematic structure of machining methods with cycloidal electrochemical shaping in general form is developed and a structural formula for kinematics of shaping is given.

Keywords

Cycloidal electrochemical shaping, discrete-slot structures, combined processing methods, birotor processing, electrochemistry, special processing methods, dimensional electrochemical processing, technological system

Received 17.02.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Chernyanskiy P.M., ed. *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov* [Design of automated machines and complexes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012 (in Russ.).
- [2] Smolentsev V.P., Osekov A.N., Potashnikov M.G. Mode calculation and production tooling design for electrochemical machining of large parts. *Vestnik VGTU* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2011, no. 4, pp. 51–54 (in Russ.).
- [3] Ivanov D.V. Criterion-based assessment of the technological configuration of metal-cutting machines with cycloidal scheme of part shaping. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2017, no. 2, pp. 39–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-2-39-49> (in Russ.).
- [4] Ivanov V.S., Ivanov D.V. Vector analysis of the edge cutting machining of the parts. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2010, no. 4, pp. 8–13 (in Russ.).
- [5] Ivanov V.S., Ivanov D.V. Analysis of bi-rotor machine configuration for edge cutting round-profile parts with discrete-slot surface texture. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2012, no. 7, pp. 14–20 (in Russ.).
- [6] Ivanov D.V. *Elektrokhimicheskaya obrabotka mashinostroitel'nykh detaley* [Electrochemical treatment of machine parts]. V: *Studencheskiy vestnik MGTU im. Baumana* [In: Students bulletin of the Bauman MSTU]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004, pp. 42–49 (in Russ.).

- [7] Shestakov I.Ya., Voroshilova M.V., Voroshilov D.S. Capabilities of electrochemical dimensional machining of thin-walled oversized aircraft details using rotating cathode-instrument. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SibSAU], 2017, vol. 18, no. 1, pp. 227–231 (in Russ.).
- [8] Orlov V.F., Chugunov B.I. Elektrokhimicheskoe formoobrazovanie [Electrochemical shaping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990 (in Russ.).
- [9] Shcherbak G.A., Trifanov I.V., Trifanova L.I. Modelling of process of electrochemical dimensional processing by the cathode making oscillatory and vibrating movements. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SibSAU], 2005, no. 3, pp. 262–265 (in Russ.).
- [10] Boldyrev A.I., Boldyrev A.A., Grigorash V.V. Influence of operating conditions in anodic dissolution process on quality assurance of electrochemical shaping. *Vestnik VGTU* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2017, vol. 13, no. 4, pp. 98–104 (in Russ.).

Tetyushin I.D. — Student, Department of Metal-Cutting Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Kauderer K.M. — Student, Department of Metal-Cutting Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ivanov D.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Metal-Cutting Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Tetyushin I.D., Kauderer K.M. Use of cycloidal electrochemical shaping for manufacturing slot structures on thin-walled workpieces and workpieces made of hard-to-machine materials. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 03(68). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-03-780.html> (in Russ.).