

Разработка технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования

А. В. Кузовкин¹, А. П. Суворов¹, Д. Е. Крохин¹, В. В. Куц² ✉

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Московский пр. 14, г. Воронеж 394026, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Создание методологии, позволяющей проектировать электроды-инструменты (ЭИ) при использовании передовых систем автоматизированного проектирования (САПР), путем формирования рабочей поверхности инструмента с геометрией, обратнoэквиdистантной геометрии заданной детали при учете величины межэлектродного зазора (МЭЗ), рабочего поступательного или поступательно-вращательного движения ЭИ, величины слоя токопроводящего покрытия исходя из технологических параметров процесса обработки. Так же необходимо предложить, внедрить и сформировать технологические рекомендации применительно к процессу производства ЭИ из диэлектрических материалов аддитивными методами с последующим формированием на них токопроводящего слоя, величина которого должна обеспечить протекание рабочих электрических процессов в межэлектродном зазоре и необходимую стойкость инструмента. Это даст возможность расширить сферу применения комбинированных ЭИ применительно к комбинированным методам обработки, которым свойственны широкое разнообразие форм рабочей поверхности, соответствующей геометрии обрабатываемой заготовки, не ограниченной величиной степени кривизны, на порядок более низкой себестоимостью и высоким показателем технологичности при создании специального инструмента для опытного и единичного производства.

Методы. При выполнении работы были использованы теоретические положения классических закономерностей в области технологии машиностроения, электрических методов обработки, известные закономерности быстрого прототипирования и аддитивных технологий.

Результаты. Разработаны теоретические основы и технология изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования и предложена методика по расчету и проектированию рабочей части ЭИ, учитывающая геометрические параметры обрабатываемой поверхности с учетом изменяемой величины МЭЗ.

Заключение. Обоснован механизм проектирования электрода-инструмента средствами цифрового прототипирования в современных САД-системах с учетом особенностей геометрии детали, межэлектродного зазора и материала металлизации.

Ключевые слова: аддитивные технологии; электрод-инструмент; электроэрозионная обработка; проектирование; машиностроение.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта РФФИ в рамках научного проекта №19-38-50076.

Для цитирования: Разработка технологии изготовления комбинированного электрода-инструмента методом быстрого прототипирования / А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, Д. Е. Крохин, В. В. Куц // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 52-67. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-52-67>.

Поступила в редакцию 29.11.2019

Подписана в печать 22.12.2019

Опубликована 21.02.2020

Development of the Technology for Manufacturing a Combination EDM Electrode by Rapid Prototyping

Aleksey V. Kuzovkin ¹, Alexander P. Suvorov ¹, Dmitriy Y. Krokhin ¹,
Vadim V. Kuts ² ✉

¹ Voronezh State Technical University
14 Moskovskiy av., Voronezh 394026, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a methodology that allows designing EDM electrodes applying advanced computer-aided design (CAD) systems by forming the tool's working surface with geometry which is inverse equidistant to the geometry of a given workpiece taking into account the EDM gap, working translation or translation-rotational motion of EDM electrodes, the value of the layer of conductive coating based on the technological parameters of the processing procedure. It is also necessary to propose, implement and formulate technological guidelines for manufacturing EDM electrodes from dielectric materials by additive techniques with the subsequent formation of a conductive layer on them; the value of the layer should ensure the flow of working electrical processes in the EDM gap and the necessary tool life. This will make it possible to expand the scope of application of combination EDM electrodes as applied to combined processing techniques which are characterized by a wide variety of working surface shapes, which correspond to the geometry of the workpiece, which is not limited by the degree of curvature, has by far lower cost and high processability when creating a special tool for pilot and single manufacturing.

Methods. When carrying out the work, theory of the classical laws of mechanical engineering technology, electrical processing techniques, the known laws of rapid prototyping and additive technologies were used.

Results. The theoretical foundations and the technology for manufacturing combination EDM electrodes by rapid prototyping have been developed and a methodology for calculating and designing the working part of EDM electrodes has been proposed taking into account the geometric parameters of the machined surface and a variable EDM gap value.

Conclusion. The mechanism of EDM electrode design by means of digital prototyping in modern CAD systems is justified taking into account the features of the workpiece geometry, EDM gap and metallization material.

Keywords: additive technology; EDM electrode; EDM process; designing; machine building.

Conflict of Interest: The authors declare the absence of overt and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The study was supported by the Grant of RFFI №19-38-50076.

For citation: Kuzovkin A. V., Suvorov A. P., Krokhin D. Y., Kuts V. V. Development of the Technology for Manufacturing a Combination EDM Electrode by Rapid Prototyping. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 52-67 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-52-67>.

Received 29.11.2019

Accepted 22.12.2019

Published 21.02.2020

Введение

Для разрабатываемых в настоящее время изделий в области машиностроения характерна все возрастающая сложность, заключающаяся в увеличении числа сборочных единиц и узлов, состоящих из деталей с широкой номенклатурой типоразмеров, прочностных и массогабаритных характеристик, эргономических и эстетических факторов.

Формообразование деталей со сложной геометрией, к которой можно отнести, например, криволинейные или некруглые отверстия, отверстия и пазы очень маленьких размеров и т.д., традиционными технологиями механообработки может вызывать значительные затруднения, связанные с необходимостью программирования сложных траекторий подачи режущего инструмента, покупки или изготовления специальных средств технологического оснащения, что значительно повышает трудоемкость и себестоимость продукции в машиностроении.

Материалы и методы

Для решения вышеуказанной технологической проблемы высокую эффективность показало использование электрофизикохимических и комбинированных технологий, основанных на

достаточно хорошо исследованных к настоящему времени электрохимической и электроэрозионной обработке профильным электродом – инструментом. Формообразование геометрии заданной детали происходит путем копирования профиля фасонного электрода инструмента, который, как правило, обратноэвидистантен обрабатываемой поверхности. При этом для электрода характерно простое поступательное или вращательное движение, что позволяет значительно снизить сложность применяемого оборудования и оснастки.

Таким образом, достоинством комбинированных электрофизикохимических методов является более широкая сфера их применения, которую можно обеспечить лишь при решении проблемы изготовления электродов-инструментов широкой номенклатуры, характеризующихся высокой точностью и невысокой себестоимостью. В настоящее время, при использовании традиционных технологий изготовления электродов-инструментов (например, механообработка) затраты трудовых и финансовых ресурсов еще достаточно велики и, в ряде случаев, превышают стоимость аналогичного инструмента для обработки резанием. Таким образом, при наличии

эффективных, апробированных во всем мире электрофизикохимических технологий до сих пор не устранен фактор, снижающий их эффективность – сложность создания точного, стойкого электрода-инструмента, обладающего низкой себестоимостью. Особенно это актуально в случае применения вышеуказанных технологий в мелкосерийном, единичном и гибком производстве в машиностроении и аэрокосмической промышленности [1-5].

Преодоление вышеуказанной проблемы может стать возможным при реализации комплексного подхода, состоящего из следующих этапов:

– разработка методологии для проектирования электродов-инструментов с использованием передовых систем автоматизированного проектирования, путем формирования рабочей поверхности инструмента с геометрией, обратноравностной геометрией заданной детали при учете величины межэлектродного зазора, рабочего простого поступательного или поступательно-вращательного движения инструмента, величины токопроводящего покрытия исходя из технологических параметров процесса обработки и т.д.;

– предложить, внедрить и сформировать технологические рекомендации применительно к процессу производства ЭИ из диэлектрических материалов аддитивными методами с последующим формированием на них токопроводящего слоя, величина которого должна обеспечить протекание рабочих элект-

рических процессов в межэлектродном зазоре и необходимую стойкость инструмента.

Это даст возможность расширить сферу применения комбинированных ЭИ применительно к комбинированным методам обработки, которым свойственны широкое разнообразие форм рабочей поверхности, соответствующей геометрии обрабатываемой заготовки, не ограниченной величиной степени кривизны, на порядок более низкой себестоимостью и высоким показателем технологичности при создании специального инструмента для опытного и единичного производства.

Результаты и их обсуждение

В ходе теоретических исследований авторами сформулированы математические зависимости для расчета геометрических размеров математически рационального профиля ЭИ. В основу этих зависимостей положены фундаментальные понятия теории электрических методов обработки – это величина межэлектродного зазора и ее зависимость от технологических режимов (вид обработки, электрические параметры, обрабатываемого материала и т.д.) Ясно, что все это многообразие технологических параметров вызывает необходимость адаптации ранее полученных зависимостей применительно к конкретным условиям [6-12].

Рассмотрим процесс корректировки прошивания отверстий как одного из самых изученных приемов электрооб-

работки. На рис. 1 представлены схемы формирования МЭЗ прошивания сквозных и глухих отверстий.

Из теории электроэрозионной обработки известно, что формирование боковых и торцевых зазоров зависит от таких параметров, как энергия электрических импульсов, среднее значение силы тока, частоты следования импуль-

сов, расхода рабочей жидкости, подаваемой через межэлектродный промежуток, а так же размеров зоны обработки.

При заданном технологическом режиме обработки величины межэлектродных зазоров a_r и a_c увеличиваются при уменьшении жидкости при прокачке, и достигают максимальных значений, если движения рабочей жидкости нет.

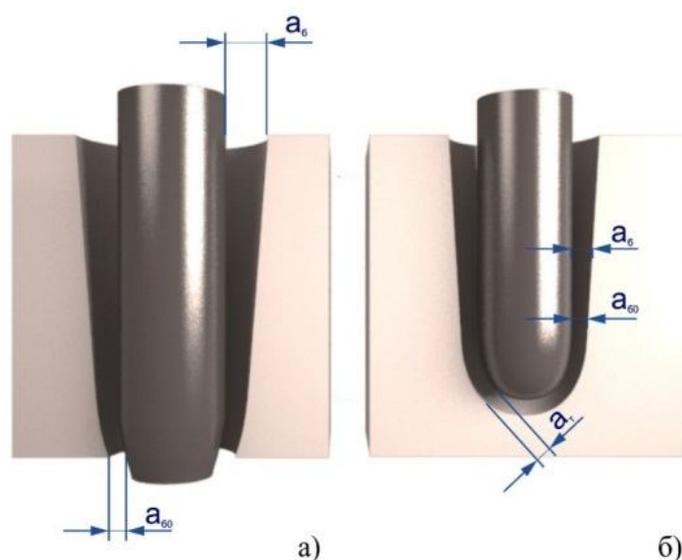


Рис. 1. Варианты формирования межэлектродного зазора при изготовлении глухих и сквозных отверстий

Fig. 1. EDM gap kinds when flashing blind and through holes

Различие значений a_r и a_c необходимо учитывать, когда рассчитывают и корректируют размеры электрода-инструмента, чтобы получить требуемую точность готовой детали. Известно несколько вариантов объемного копирования (без вращательного движения), отличающихся особенностями формирования межэлектродного зазора (рис. 2). К ним относятся:

1. Обработка деталей типа «Тело вращения» (рис. 2, а). Размеры электрода-инструмента снижаются пропорциональ-

но по отношению к размерам заготовки на значение максимального зазора со стороны торца, формирующегося на входе в полость, прошиваемой детали.

2. Обработка поверхностей фасонного типа, которые образуются при сочетании наклонных и вертикальных поверхностей (рис. 2, б). В начале прошиваемой полости присутствуют не только торцевые, но и боковые зазоры. Вертикальные участки геометрии электрода-инструмента корректируются в сторону снижения эквидистантно к профилю об-

рабатываемой детали на размер соответствующих боковых зазоров. Наклонные участки соответственно корректируются на величину максимальных зазоров со стороны торцов. Данный способ формирования размеров дает возможность исключить нерациональное завышение припуска для последующей обработки.

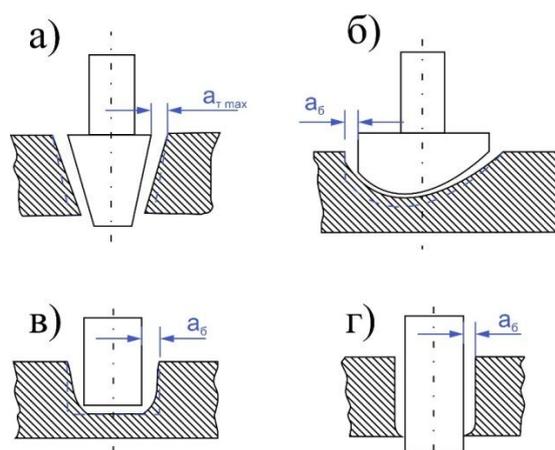


Рис. 2. Схема учета МЭЗ для коррекции размеров ЭИ

Fig. 2. The scheme of EDM gap metering for correction of EDM electrode dimensions

Все эти условия, зависящие от применяемой схемы обработки, реализованы в «Подсистеме параметризации электрода-инструмента для электроэрозионной обработки»

Авторами работы [13,14] на основе экспериментов было установлено, что минимальное значение торцевого зазора при обработке фасонных полостей приблизительно равен значению начального бокового зазора $a_{т max} = a_{б}$.

Таким образом подтверждена корректность ранее полученных зависимостей для комбинированного ЭИ и практических результатов, полученных авторами работ [14 и др.] для цельных ЭИ.

3. Обработка поверхностей типа щелей, пазов, отверстий (рис. 2, б, г). Размеры электрода-инструмента при проектировании уменьшают по сравнению с размерами обрабатываемой детали эквидистантно на значение максимального бокового зазора в начале обрабатываемого отверстия, щели или паза.

При построении 3D-модели комбинированного ЭИ применялся продукт Autodesk Inventor (собственно построение 3D-модели электрода-инструмента) и встроенный инструмент Plogic (технология, программирования технических характеристик непосредственно в 3D-модели). На ранней стадии проектирования инструмента создается рациональная 3D параметрическая модель, при этом обеспечивается:

- возможность для проектирования различных типоразмеров электродов - инструментов всегда оставаться в пределах рациональной геометрии;
- снижение сроков проектирования, за счет того, что в основу цифровой мо-

дели прототипа ЭИ заложена поверхность, которая обратноэвидициантна геометрии обрабатываемой поверхности;

– технология Logic дает возможность перераспределения параметров электродов-инструментов, с одновременной корректировкой величины слоя токопроводящего покрытия при различных случаях геометрии и величины межэлектродного зазора.

Последнее утверждение реализовано с помощью созданной подсистемы [16], что позволяет инженеру-технологу:

– оперативно корректировать геометрию модели ЭИ;

– определять режимы 3D-печати в зависимости от изменения материала нетокопроводящей основы и последующего токопроводящего слоя.

Управление вышеупомянутыми параметрами на этапе конструкторской подготовки производства при создании 3D-модели готового изделия, позволяет выполнить проектирование ЭИ. При этом, правила и значения iLogic располагаются в файле 3D-модели вместе с геометрическими параметрами проектируемого ЭИ.

На основе вышеизложенных правил авторами был разработан программный модуль, предназначенный для автоматизации процесса проектирования инструментов для электроэрозионной обработки на основе цифрового прототипа заданной детали, при этом учитывались теоретические положения электрических методов обработки по расчету межэлектродного зазора и величины токопроводящего покрытия (рис. 3).

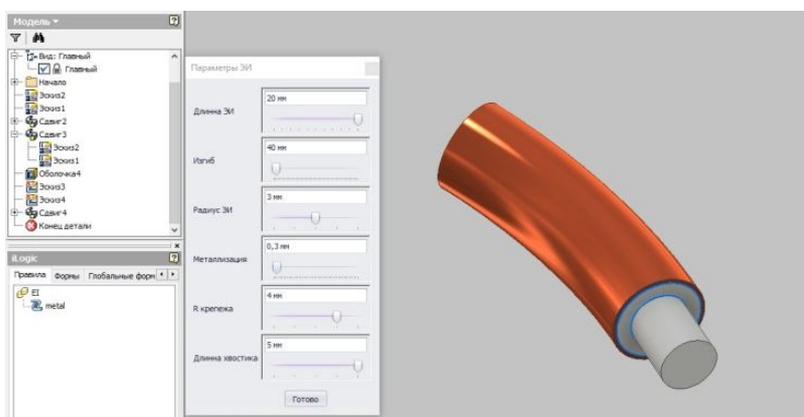


Рис. 3. Построение правил в Inventor

Fig. 3. Building rules in Inventor

В основу твердотельного прототипирования и изготовления комбинированного инструмента положена технология 3D-печати с последующим нанесением токопроводящего покрытия,

толщиной, обеспечивающей протекание процесса электрообработки.

Современные технологии 3D-печати укрупненно могут быть представлены в виде: экструзии, фотополимери-

зации, лазерного спекания, ламинирования и склеивания [17].

При использовании технологии экструзии [21] материал расплавляется и в жидком виде продавливается через сопло (одно или несколько) малого диаметра; слои адгезируют друг с другом и при охлаждении застывают, приобретая конструкционную прочность.

При фотополимеризации [21] жидкий фотополимер застывает под воздействием ультрафиолетового излучения.

Лазерное спекание характеризуется тем, что материал в виде порошка или гранул послойно наносится тонким равномерным слоем и затем спекается под действием лазера [21].

При лазерной стереолитографии, на поверхности жидкого фотополимера, засвеченные лазером микроучастки застывают и попиксельно образуют очередной слой будущего объекта. Затем происходит погружение готового слоя и формирование следующего [21].

Технология ламинирования представляет собой слои из тонких пленок, каждый из которых вырезается в форме сечения будущей детали [21]. Слои последовательно соединяются нагревом

или давлением, что создает в конечном счете готовую форму [21].

При склеивании основа в виде порошка или гранул формирует слои с помощью жидкого клея, подаваемого из сопла [21].

Для изготовления ЭИ для электрических методов обработки был выбран метод экструзии, который характеризуется:

- доступностью и низкой стоимостью оборудования;
- высокой точностью ($\pm 0,1$ мкм) получаемых объектов;
- прочностью готовых деталей (для ABS пластика $\sigma_b=22$ МПа);
- хорошей способностью к адгезии и технологической простотой нанесения токопроводящего покрытия.

В качестве материала, для печати диэлектрической основы комбинированного ЭИ были использованы Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) и Polylactide (PLA) пластики:

ABS пластик. ударопрочен, не токсичен, не имеет запаха и химически нейтрален. Температура плавления варьируется в диапазонах от 220 до 260 °С. В промышленности применяют пластик в двух видах: нить (рис. 4) и порошок.

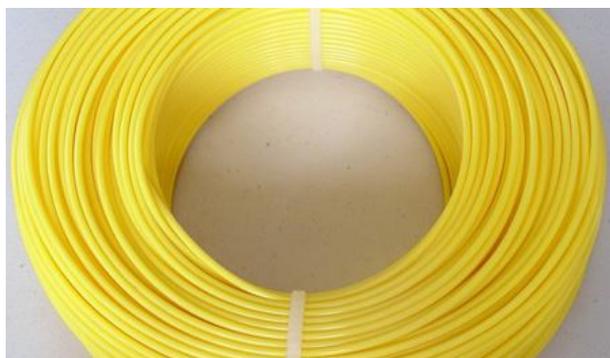


Рис. 4. Нить ABS пластика, используемая в исследованиях

Fig. 4. ABS plastic thread used in research

– PLA пластик – экологически чистый и безопасный материал. Температура его плавления около 190-220 °С. В промышленности PLA пластик применяется в виде нити, аналогичным, представленным на рис. 4.

Основными недостатками данного материала являются:

- разрушение под воздействием тепла и света;
- невысокая прочность при ударных нагрузках.

Так же в ходе экспериментов использовался нейлон, который по своим характеристикам близок к ABS пластику. Однако нейлон токсичен, имеет высокую температуру плавления (около 320 °С) и гигроскопичен. Последнее делает его применение невозможным для электрических методов обработки, так как обработка ведется с применением жидких технологических сред.

По данным литературы [17] известно использование в качестве сырья для 3D-печати металлического порошка. Металлический порошок легких и цветных металлов (алюминий, медь, сплавы на основе серебра и др.), как правило содержит специальные добавки, например, в виде стекловолокна или керамики.

Такой материал, обладающий токопроводящими свойствами, можно считать самым рациональным материалом для изготовления ЭИ. Его использование позволяет исключить окончательную технологическую операцию – нанесение диэлектрическую основу то-

копроводящего слоя заданной толщины. Однако применение металлических порошков в настоящее время сдерживается стоимостью оборудования для 3D-печати [17]. Следует сказать, что стоимость такого 3D-принтера сопоставима со стоимостью промышленного механически обрабатывающего центра с ЧПУ [17,18].

На основе теоретических исследований авторами были выявлены факторы, оказывающие влияние на величину изменения линейных размеров объектов, а именно:

- температура печати;
- диаметр экструдера;
- вертикальная величина подачи сопла экструдера;
- температура рабочего стола;
- процент заполнения модели материалом.

Авторами экспериментальным путем были определены коэффициенты, учитывающие величину изменения линейных размеров объектов, полученных методами 3D-печати под влиянием вышеперечисленных факторов, для чего был спроектирован экспериментальный образец специальной формы (рис. 5).

Характерные значения линейных размеров представлены на рис. 6.

Анализ данных показал их сходимость на уровне 94-96 % при доверительном интервале $\pm 0,2$ мм. Что является приемлемым для использования результатов эксперимента на практике [18-20].



Рис. 5. Экспериментальный образец для определения коэффициента термоусадки, полученный при толщине нити: **а** – 0,4 мм; **б** – 0,8 мм

Fig. 5. A prototype for determining heat shrink ratio obtained when: **а** – thread thickness 0,4 mm; **б** – thread thickness 0,8 mm

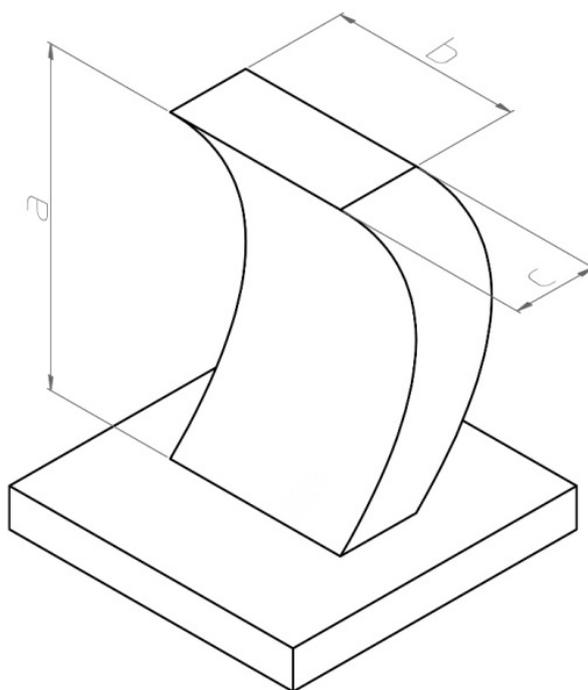


Рис. 6. Пояснение по определению коэффициента термоусадки образцов

Fig. 6. Explanation of the determination of the heat shrink ratio of the samples

Проведение эксперимента позволило предположить для промышленной апробации форму ЭИ, которая разработана для удаления заусенцев и скругле-

ния острых кромок на выходе из каналов рабочего колеса турбокомпрессорного агрегата (ТНА) (рис. 7) и содержит рабочие поверхности с кривизной 2G и 3G (рис. 8).



Рис. 7. Рабочее колесо ТНА, послужившее прототипом для создания формы экспериментального ЭИ

Fig. 7. The impeller of the turbopump unit used as a prototype for creating the shape of the pilot of EDM electrode

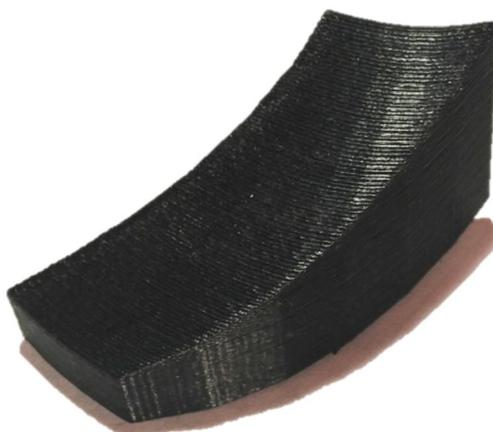


Рис. 8. Токопроводящая основа комбинированного ЭИ с рабочими поверхностями с кривизной 3G и 2G

Fig. 8. The conductive base of the combination EDM electrode with work surfaces with curvature of 3G and 2G

Выводы

Проведенные авторами работы позволили разработать автоматизированный метод расчета электродов-инструментов для электрофизикохимической обработки за счет многопараметрического генерирования средств техноло-

гического оснащения комбинированными методами быстрого прототипирования и нанесения покрытий, что позволило обеспечить заданные параметры и сравнительно низкую себестоимость процессов обработки деталей.

Список литературы

1. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – Manuf Technol, 2007, 56 (1). P. 241–244.
2. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach Int J Adv Manuf Technol, 2011, 53. P. 181–190.
3. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy // Chinese Journal of Aeronautics. February 2013. Vol. 26, is. 1. P. 224–229.
4. Burns M Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing (Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall). 1993. 369 p.
5. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M., Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. P. 319–328.
6. Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 24. P. 11832-11835.
7. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов [и др.] // СТИН. 2017. № 4. С. 24-26.
8. Errors in shaping by a planetary mechanism / V.A. Grechishnikov, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, S.Y. Yurasov // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. № 9. С. 824-826.
9. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе аддитивного формообразования изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 122-129.
10. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry // MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842
11. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming // MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842

12. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces // MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 224, 01058 (2018) DOI: 10.1051 / matecconf / 201822401058
13. Суворов А. П., Кузовкин А. В. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 9-15.
14. Суворов А. П., Кузовкин А. В. Параметрическое проектирование электрода-инструмента для электрообработки с помощью модуля iLogic // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 105-109.
15. Суворов А. П., Кузовкин А. В. Перспективы использования современных информационных технологий в обработке сложных поверхностей // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. №1. С. 83-87.
16. Vladislav P. Smolentsev, Oleg N. Fedonin, Eugene V. Smolentsev Electroerosion formation and technology of cast iron coatings on aluminum alloys // MATEC Web of Conferences. 2017. 129, 01016, DOI: 10.1051/matecconf/201712901016
17. Комбинированные методы повышения качества поверхностного слоя материалов / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов, Е.В. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. №1 (321). С. 90-97.
18. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Процесс эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т.13. № 3. С. 107-115.
19. Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник РГАТУ им. П.А Соловьева. 2017. №2. С.5-9.
20. Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Смоленцев Е.В. Станочное оборудование для прошивки с использованием электрических методов обработки // Справочник. Инженерный журнал. 2018. № 5 (254).
21. 3D-печать позволяет создавать «настольные» реакторы для производства лекарств // Кодинг и вебмастеринг для чайников. Сайт для айтишников. URL: <https://webstudio-uwk.ru/3d-pechat-pozvoljaet-sozdavat-nastolnye-reaktory/>

References

1. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode CIRP Ann – *Manuf Technol*, 2007, no.56 (1), pp. 241–244.
2. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, no.53, pp. 181–190.

3. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy. *Chinese Journal of Aeronautics*, February 2013, vol. 26, is. 1, pp. 224–229.

4. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing (Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall), 1993, 369 p.

5. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M., Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography *Computer-Aided Design & Applications*, 2005, no. 2, pp. 319–328.

6 Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-11835.

7. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Razumov M. S. and others. Opređenje pogreshnosti formy detali pri formoobrazovanii planetarnym mekhanizmom metodami geometricheskoi teorii rezaniya [Determination of the error in the shape of a part shaping by a planetary mechanism using the methods of geometric cutting theory]. *STIN= STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26 (In Rus.).

8. Grechishnikov V.A., Romanov V.B., Pivkin P.M., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Yurasov S.Y. Errors in shaping by a planetary mechanism. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.

9. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Upravlenie prostranstvennoi orientatsiei uzlov robota v protsesse additivnogo formoobrazovaniya izdelii [Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, no.4, pp. 122-129 (In Russ.).

10. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry. MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842.

11. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming. MATEC Web of Conferences. Vol. 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842.

12. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces.. MATEC Web of Conferences: International

Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 224, 01058 (2018) DOI: 10.1051 / mateconf / 201822401058.

13. Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Ispol'zovanie additivnykh tekhnologii v proizvodstve fasonnykh poverkhnostei [The use of additive technologies in the manufacture of shaped surfaces]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*. = *Bulletin of Rybinsk State Aviation Technological Academy*, 2017, no. 2, pp. 9-15 (In Russ.).

14. Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Parametricheskoe proektirovanie elektroda-instrumenta dlya elektroobrabotki s pomoshch'yu modulya ilogic [Parametric design of an electrode-tool for electric processing using a module ilogic]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2017, no. 1, pp. 105-109 (In Russ.).

15. Suvorov A. P., Kuzovkin A. V. Perspektivy ispol'zovaniya sovremennykh informatsionnykh tekhnologii v obrabotke slozhnykh poverkhnostei [Prospects for the use of modern information technologies in the processing of complex surfaces]. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii* = *Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*, 2016, no. 1, pp. 83-87 (In Russ.).

16. Smolentsev V. P., Fedonin O. N., Smolentsev E. V. Electroerosion formation and technology of cast iron coatings on aluminum alloys. MATEC Web of Conferences 129, 01016 (2017), DOI: 10.1051/mateconf/201712901016.

17. Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Ivanov V.V., Smolentsev E.V. Kombinirovannye metody povysheniya kachestva poverkhnostnogo sloya materialov [Combined methods for improving the quality of the surface layer of materials]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2017, no.1 (321), pp. 90-97 (In Russ.).

18. Kondratiev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. Protsess erozionno-luchevogo plazmennogo naneseniya iznosostoikikh pokrytii [The process of erosion-beam plasma deposition of wear-resistant coatings]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol.13, no. 3, pp. 107-115 (In Russ.).

19. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya kombinirovannykh metodov obrabotki [Status and development prospects of combined processing methods]. *Vestnik RGATU im. P.A Solov'eva* = *Bulletin of Rybinsk State Aviation Technological Academy*, 2017, no.2, pp. 5-9 (In Russ.).

20. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Smolentsev E.V. Stanochnoe oborudovanie dlya proshivki s ispol'zovaniem elektricheskikh metodov obrabotki [Machine tools for firmware using electrical processing methods]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* = *Handbook. Engineering Journal*, 2018, no. 5 (254), pp. 38-46 (In Russ.).

21. 3D-pechat' pozvolyaet sozdavat' «nastol'nye» reaktory dlya proizvodstva lekarstv [3D printing allows you to create "desktop" reactors for the production of medicines]. *Koding i vebmastering dlya chainikov* [Coding and webmasters for dummies. Website for it professionals]. (In Russ.). Available at: <https://webstudio-uwk.ru/3d-pechat-pozvoljaet-sozdavat-nastolnye-reaktory>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузовкин Алексей Викторович, доктор технических наук, заведующий кафедрой графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: akuzovkin@mail.ru

Aleksey V. Kuzovkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Graphics, Design and Information Technologies in Industrial Design, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: akuzovkin@mail.ru

Суворов Александр Петрович, старший преподаватель кафедры графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: alex_diz@inbox.ru

Alexander P. Suvorov, Senior Lecturer, Department of Graphics, Design and Information Technologies in Industrial Design, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: alex_diz@inbox.ru

Крохин Дмитрий Евгеньевич, аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: Krochin.1993@mail.ru

Dmitriy Y. Krokhin, Post-graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Krochin.1993@mail.ru

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-3244-1359>

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-002-3244-1359>