

Научная статья

УДК 621.9.048.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-559-567>

Влияние орбитального движения электрода на точность электроэрозионной обработки

Петр Владимирович Татанов¹, Андрей Романович Янюшкин²,
Дмитрий Александрович Шнайдер³, Александр Сергеевич Янюшкин^{4✉}

^{1,2,3,4} Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

¹ tatanov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9919-6194>

² andreyayushkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>

³ dmitrij.schneider@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2426-3839>

⁴ yanyushkinas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

Аннотация. Цель – изучение процессов, возникающих при электроэрозионной обработке инструментальных сталей, влияние орбитальных движений электрода на точность обработки, а также обоснование применения индивидуальных траекторий орбит и внедрение этих данных в производство. Для написания программы траектории в машинных кодах на станок Mitsubishi EA-28 использовался программный комплекс CIMCO EDIT. Выполнялись опытное изготовление и замеры пуансона и толкателя вырубного штампа. Обработка производилась на электроэрозионном прошивном станке Mitsubishi EA-28. Прожиг осуществлялся в среде диэлектрика Blasospark GT 250. Обработка совершалась до шероховатости Ra0.6 за 9 проходов с применением стандартного пакета режимов обработки. В ходе проведенных опытных работ было выявлено влияние геометрии электрода на обработку острых углов: формирование на обрабатываемой детали «паразитных радиусов». Установлено, что при засверливании углов отверстиями с малым диаметром (0,4–0,6 мм) данное явление исчезает. Также замечен эффект инверсии движения электрода в зависимости от обкатки по внутреннему или внешнему краю траектории. Осуществлена обработка производственной детали (пуансон вырубного штампа). Во время обработки использовалась новая орбита, адаптированная геометрии изделия. Установлено, что деталь является отвечающей требованиям и соответствует конструкторскому чертежу. Штамп собран и передан в основное производство. По результатам проведенных испытаний, изучения отечественного и зарубежного опыта выработаны рекомендации по применению индивидуальных орбит при электроэрозионной обработке инструментальных сталей, твердых сплавов и других труднообрабатываемых токопроводящих материалов. Метод орбитальных движений по специальной траектории был внедрен на АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (г. Чебоксары).

Ключевые слова: мультиосевая обработка, электроэрозия, проволоочная вырезка, электроды, орбитальное движение электрода, индивидуальная орбита

Для цитирования: Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шнайдер Д. А., Янюшкин А. С. Влияние орбитального движения электрода на точность электроэрозионной обработки // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 559–567. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-559-567>.

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Impact of orbiting electrode motion on the accuracy of electrical discharge machining

Petr V. Tatanov¹, Andrey R. Yanushkin², Dmitriy A. Schneider³, Alexander S. Yanyushkin^{4✉}

^{1,2,3,4} I. N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

¹ tatanov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9919-6194>

² andreyayushkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>

³ dmitrij.schneider@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2426-3839>

⁴ yanyushkinas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

Abstract. The present study is designed to study processes occurring during the electrical discharge machining (EDM) of tool steels, the influence of orbiting electrode motion on its accuracy, as well as to justify the application of individual orbiting trajectories and implement these data into production. To that end, a trajectory program was written in machine codes for a Mitsubishi EA-28 die-sinking electrical discharge machine using the CIMCO EDIT software package. Also, a prototype punch and ejector of the blanking die were produced and measured. The standard modes of Mitsubishi EA-28 were used to carry out machining in Blasospark GT 250 dielectric fluid to a roughness of Ra 0.6 in 9 passes. The experiments revealed the influence of electrode geometry on the machining of sharp corners, i.e., the formation of unwanted radii on the workpiece. However, this phenomenon is not observed when the corners are drilled with small diameter holes (0.4–0.6 mm). Depending on the machining process along the inner or outer trajectory, inverse electrode motion is also observed. The production part (punch of the blanking die) was machined using a new orbit adjusted to the geometry of the product. The part was found to be consistent with the requirements and the engineering drawing, thus allowing the assembled die to enter the main production. The results of the performed tests, as well as the study of domestic and foreign experience, were used to develop recommendations on the use of individual orbits in the EDM of tool steels, hard alloys, and other hard-to-machine conductive materials. The method of orbiting motion along a particular trajectory was implemented at Cheboksary Electrical Apparatus Plant (Cheboksary).

Keywords: multi-axis machining, electroerosion (electrical discharge machining), wire cutting, electrodes, electrode orbital motion, individual orbit

For citation: Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Schneider D. A., Yanyushkin A. S. Impact of orbiting electrode motion on the accuracy of electrical discharge machining. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):559-567. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-559-567>.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдая за развитием науки и техники, нельзя не заметить существенной разницы перехода от грубой технологии обработки деталей до высокотехнологичной, инновационной, высокоточной. Аналогичная ситуация была и с процессом электроэрозионной обработки (ЭЭО). Поначалу ЭЭО использовалась в подготовительных операциях как способ удаления излишнего припуска, для последующих чистовых операций, а также извлечения сломанных режущих инструментов. Повышение точности происходило за счет изменения элементов процесса обработки. Это отразилось на эволюции генераторов тока, механизмах приводов и траектории перемещения электрода. Появление орбитальных движений в ЭЭО значительно повысило качество и точность обработки. Изучение влияния орбитального движения ведется как иностранными [1–3], так и отечественными исследователями [4–8].

Орбитальные движения электрода (разбивка) необходимы во время электроэрозионной обработки для обеспечения точности размера и необходимой шероховатости. Существенное значение при этом имеет движение электрода относительно заданной координаты по специальной траектории (рис. 1).

Так как электроэрозионный процесс представляет собой поток электрических разрядов между электродом и обрабатываемой деталью, то электроды представляют собой поверхности, расположенные от детали на расстоянии электрического зазора. Физика процесса ЭЭО изображена на (рис. 2)⁵.

На сегодняшний день не существует конкретной методики, описывающей орбитальное движение при эрозионной обработке металла. Для этого сложного процесса обработки не существует даже единой убедительной теории. Однако эмпирические данные свидетельствуют об эффективных процессах, которые происходят во время электроэрозионной обработки. Поэтому целью настоящей работы является влияние орбитальных движений на точность обработки, возникающих при электроэрозионной обработке; обоснование применения индивидуальных траекторий орбит.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В нашем случае последовательность орбитальных движений изображена на рис. 3. Чем выше точность обработки, тем больше проходов осуществляет электрод. На старых станках (рис. 4) с механической логикой или однокоординатных станках ZNC (от англ. Z-

⁵Левинсон Е. М., Лев В. С. Электроэрозионная обработка металлов: справ. пособ. по электротехнологии. Л.: Лениздат, 1972. 328 с.

numerical control – числовое управление осью Z) орбитальных движений не было, и приходилось использовать несколько видов электродов (черновые и чистовые), которые имели разные электрические зазоры. Это значительно усложняло технологический процесс. Опытные эрозионисты вручную совершали «разбивку поверхностей». Для создания орбитальных движений в качестве модернизации оборудования многими производителями были выпущены накладные приспособления для реализации орбитальных движений механическим (с помощью эксцентрика) или электромеханическим (с применением сервопривода) способом. Данные накладки значительно сокращали рабочую зону по высоте обработки. На рис. 5 изображена программируемая блоком управления сервоприводов

(рис. 6) приставка для орбитальной разбивки станка FORM 2-LC ZNC.

Процесс ЭЗО представляет собой серию последовательных проходов, при которых с каждым переходом энергия искры уменьшается, а вместе с ним уменьшается и электрический зазор. Уменьшение зазора, соответственно, компенсируется орбитальным движением.

В результате электрод, двигаясь по орбите (ощупывая деталь), удаляет лишний материал. Сенсором электрода является электрическая обратная связь в виде напряжения пробоя, величина которого пропорциональна зазору. На чистовом проходе зазор составляет 0,02 мм, при начальном зазоре – 0,15–0,2 мм. Черновой зазор может достигать величин до 1,5 мм.

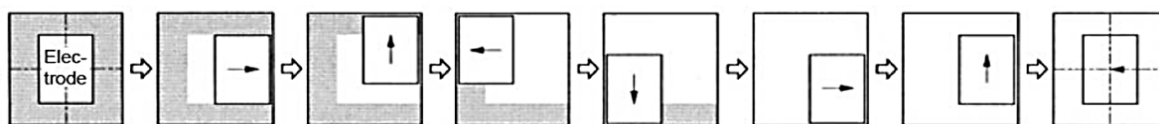


Рис. 1. Перемещение электрода по квадратной орбите

Fig. 1. Electrode moves in a square orbit

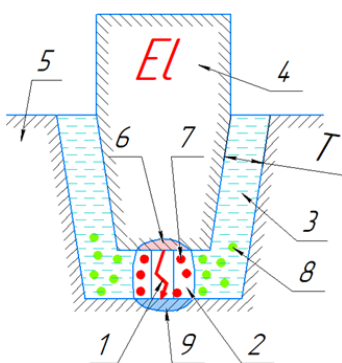


Рис. 2. Схема электроэрозионной обработки: 1 – канал разряда – электрический разряд; 2 – газовый пузырь; 3 – рабочая жидкость; 4 – электрод; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – зона износа электрода; 7 – расплавленные частицы; 8 – застывшие частицы (отход); 9 – зона обработки детали; Т – электрический зазор

Fig. 2. Diagram of electrical discharge machining: 1 – discharge channel – electric discharge; 2 – gas bubble; 3 – working fluid; 4 – electrode; 5 – part being machined; 6 – electrode wear zone; 7 – molten particles; 8 – solidified particles (waste); 9 – part processing zone; Т – electrical gap

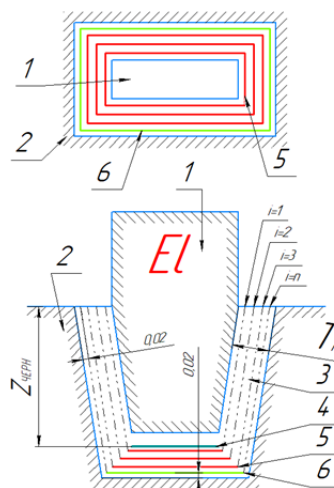


Рис. 3. Последовательность переходов электроэрозионной обработки прожига: 1 – электрод; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – рабочая жидкость; 4 – электроэрозионная обработка (черновая) без орбитального движения на глубину $Z_{\text{ЧЕРН}}$; 5 – промежуточные орбиты; 6 – чистовая орбита; T_i – электрический зазор; n – количество орбитальных движений

Fig. 3. Sequence of transitions for burn electrical discharge machining: 1 – electrode; 2 – part being machined; 3 – working fluid; 4 – electrical discharge machining (roughing) without orbital motion in depth of $Z_{\text{ЧЕРН}}$; 5 – transfer orbits; 6 – finishing orbit; T_i – electrical gap; n – number of orbital motions



Рис. 4. Станок ZNC
 Fig. 4. ZNC machine tool



Рис. 5. Приспособление для орбитального перемещения
 Fig. 5. Device for orbital motion



Рис. 6. Блок управления сервоприводами приспособления
 Fig. 6. Control unit of device's servo drives

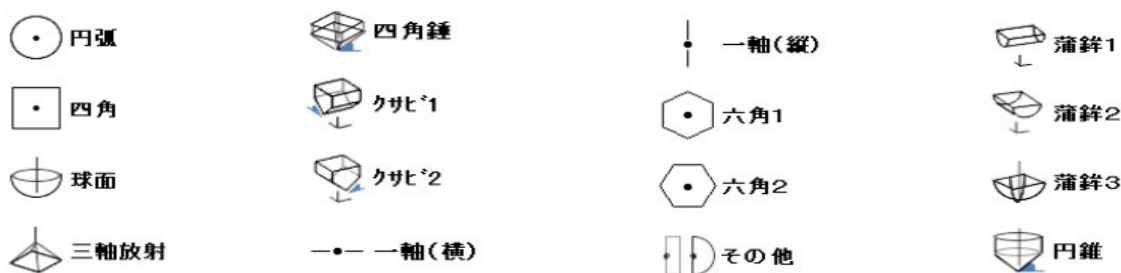


Рис. 7. Стандартные орбитальные движения на примере станка Mitsubishi EA-28
 Fig. 7. Standard orbital motions on example of the Mitsubishi EA-28 machine tool

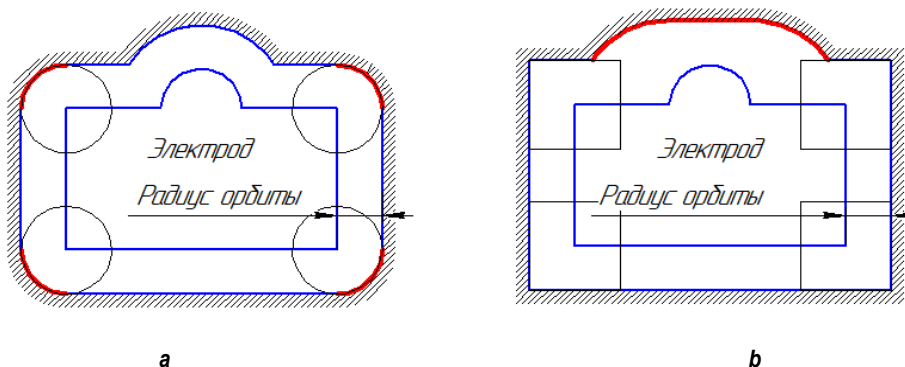


Рис. 8. Пример искажения профиля за счет орбитальных движений (красным цветом изображены искаженные поверхности): а – круговая орбита; б – квадратная орбита
 Fig. 8. Example of profile distortion due to orbital motions (distorted surfaces are marked in red): а – circular orbit; б – square orbit

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чаще всего траектории движения сервоприводов «вшиты» в память оборудования и представляют собой стандартный набор (рис. 7). Не всегда этих движений достаточно. Встречаются ситуации, когда, наоборот,

искаженно применяемая траектория может повредить (испортить) деталь или сформировать не соответствующую стандарту поверхность (рис. 8). В связи с этим появляется необходимость создания индивидуальной траектории орбитального движения электрода. Например, при изготовлении пуансона

вырубного штампа (рис. 9) возникла проблема отсутствия стандартной орбиты ЭЗО для обработки треугольного контура.

Обработка режущим инструментом также невозможна по причине малых размеров детали и высокой твердости. По стандартной технологии был разработан специальный электрод (рис. 10) и произведена обработка детали по заданной орбите (рис. 11).

На первый взгляд казалось, что все идет технологически верно. Однако замеры детали показали, что деталь бракована, а на углах треугольника были видны радиусы. Деталь оказалась непригодной для использования (рис. 12). Более внимательный анализ показал, что скругление углов связано с радиусом проволоки, которой вырезался электрод. Для исключения данного эффекта применили освобождение углов (рис. 13). Брак детали, безусловно, был связан с инверсией траектории движения. Как оказалось, электрод-матрица движется в отличие от электродов

пуансонов по инвертированной траектории. Орбита требовала корректировки. Программа корректировки показана на рис. 14.

Повторная обработка оказалась успешной. Размеры и геометрия детали оказались в допуске. Время обработки составило 43 мин. Работа производилась на станке Mitsubishi EA-28 (рис. 15). За счет гибкого изменения орбитального радиуса легко достигаются заданные размеры детали, обеспечивается эффективное удаление отхода, а электрический разряд, равномерно генерирующийся во всех направлениях, позволил достичь шероховатости обработанной поверхности до $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$. Также существенно уменьшился износ углов (рис. 16), а количество используемых электродов снизилось. Данная усовершенствованная технология успешно внедрена в производство на АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» в г. Чебоксары.

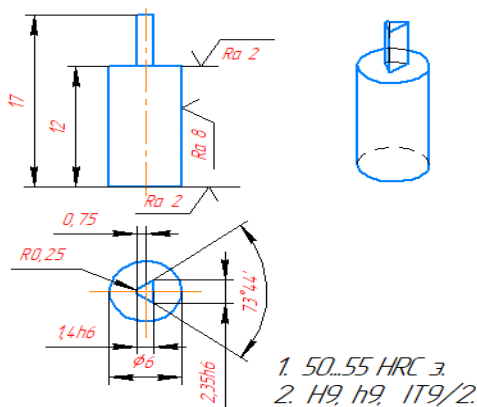


Рис. 9. Пуансон
Fig. 9. Punch



Рис. 10. Электрод
Fig. 10. Electrode



Рис. 11. Орбита и электроэрозионная обработка
Fig. 11. Orbit and electrical discharge machining

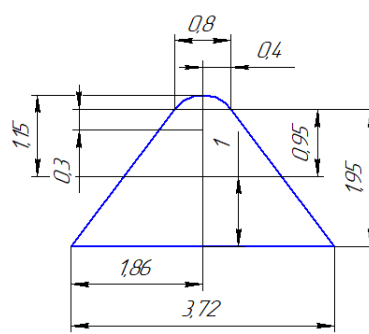
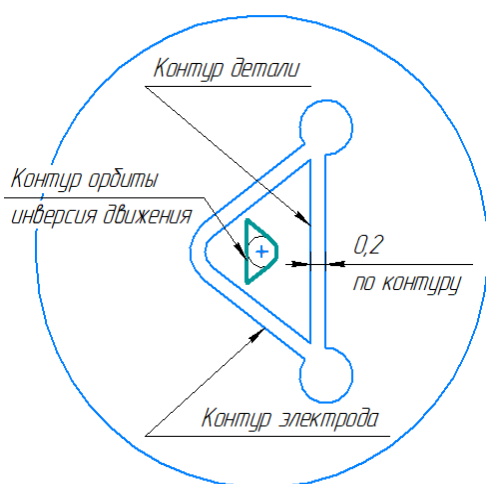
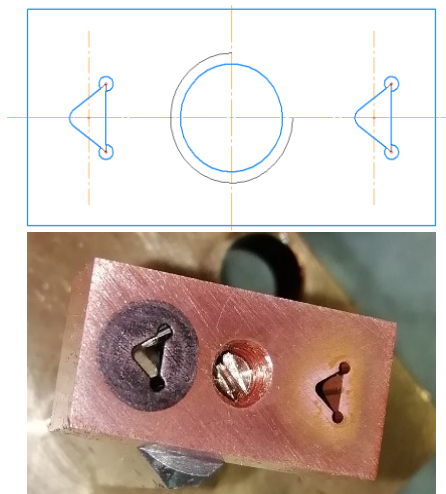




Рис. 12. «Испорченная» деталь
 Fig. 12. Spoiled part



Рис. 13. Электрод с скорректированной геометрией
 Fig. 13. Electrode with corrected geometry



N266(Treugolnik)
 G17
 G91G1X0Y0
 G1X-1.
 Y2.
 X1.6Y-1.2
 G2X-0Y-1.6I-0.6J-0.8
 G1X-1.6Y-1.2
 Y2.
 X1.
 G23

Рис. 14. Скорректированная орбита и программа орбитального движения
 Fig. 14. Corrected orbit and the program of orbital motion



Рис. 15. Готовый пуансон
 Fig. 15. Finished punch

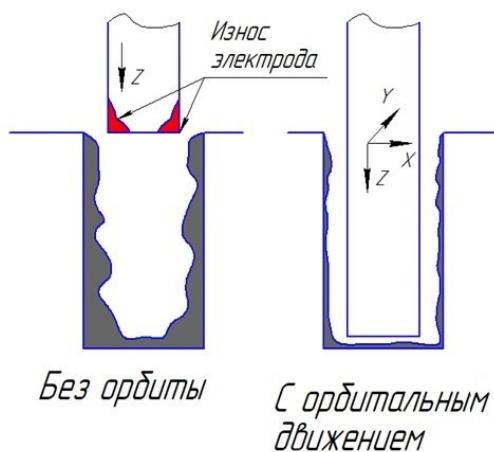


Рис. 16. Износ электрода
 Fig. 16. Electrode wear

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе представленного материала можно выделить следующие достоинства при использовании индивидуальных орбитальных движений:

– правильное использование орбит позволяет с высокой точностью исключить погрешности формы и снизить шероховатость

обработанной поверхности;

– индивидуальные орбиты позволяют точно обрабатывать не только в Z-координатах, но и в мультиосевом направлении. Это, в свою очередь, расширяет возможности автоматизации технологических процессов [2, 9–21].

Список источников

1. Wang Gang, Shan Yan. Compensation of electrode orbiting in electrical discharge machining based on non-uniform offsetting // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. Iss. 14. P. 1628–1634. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.023>.
2. Sadollah Bamerni Z., El-Hofy H. Orbital electrochemical machining of electrode discharge machined surfaces // *AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures)* / eds. E. Kulianic. Vol. 437. Vienna: Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2555-7_51.
3. Hai Peng Huang, Guan Xin Chi, Zhen Long Wang. Multi-axis EDM CNC system based on RT-Linux // *Key Engineering Materials* / eds. Daizhong Su, Qingbin Zhang, Shifan Zhu. Vol. 419–420. Trans Tech Publications Ltd, 2009. P. 809–812. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.809>.
4. Ибрагимова Л. И., Еникеев Б. А., Акмаев О. К. Кинематический анализ электроэрозионного 5 осевого станка с параллельной кинематикой // *Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста 2018.: матер. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Уфа, 28 февраля – 1 марта 2018 г.)*. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2018. С. 315–321.
5. Кратюк Н. А. Определение оптимального метода получения глубоких отверстий малого диаметра в деталях ГТД и его экспериментальное исследование // *Известия Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ»*. 2014. Т. 2. № 4. С. 20–26.
6. Сариллов М. Ю. Исследование процессов электроэрозионной обработки // *Наука и образование*. 2016. № 3. С. 76–82.
7. Смоленцев В. П., Коптев И. Т., Газизуллин К. М. Технологические возможности и перспективы развития электроэрозионной и электрохимической размерной обработки // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 2-2. С. 49–56.
8. Chen Jiang Hua, Bernaerts D., Seo Jin Won, Van Tendeloo G., Kagi H. Voidites in polycrystalline natural diamond // *Philosophical Magazine Letters*. 1998. Vol. 77. Iss. 3. P. 135–140. <https://doi.org/10.1080/095008398178561>.
9. Михалёв О. Н., Янюшкин А. С., Попов А. Ю. Современный подход к автоматизации технологической подготовки производства // *Автоматизация и современные технологии*. 2011. № 4. С. 39–43.
10. Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Рычков Д. А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // *Ползуновский альманах*. 2008. № 4. С. 214–216.
11. Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шнайдер Д. А., Янюшкин А. С. Опыт электроэрозионного фрезерования на АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 57–62.
12. Янюшкин А. Р., Лобанов Д. В., Татанов П. В. Совершенствование процесса электроалмазного шлифования // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 14–15 декабря 2020 г.)*. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. С. 144–148.
13. Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шеров К. Т., Янюшкин А. С. Использование вторичного ресурса твердосплавных сменных многогранных пластин в металлообработке // *Наука и техника Казахстана*. 2021. № 1. С. 85–96.
14. Янюшкин А. С., Баранов А. Н., Лосев А. Б., Якимов С. А. Исследование возможности замены электролитов при электроалмазной обработке на обычные смазочно-охлаждающие технические среды // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2007. Т. 1. № 2. С. 25–30.
15. Янюшкин А. С., Рычков Д. А., Лобанов Д. В., Петров Н. П. Методика формирования базы данных режущих инструментов // *Труды Братского государственного университета*. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 143–146.
16. Popov V. Yu., Yanyushkin A. S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 91–102.
17. Skeebe V. Yu., Ivancivsky V. V., Kutyshev A. V., Parts K. A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016. Vol. 126. P. 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012016>.
18. Zamashchikov Y. I. Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress // *Materials and Manufacturing Processes*. 2006. Vol. 21. Iss. 5. P. 551–566.

<https://doi.org/10.1080/10426910500471706>.

19. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a sin-gle equipment // *Materials and Manufacturing Processes*. 2015. Vol. 30. Iss. 12. P. 1408–1411.

<https://doi.org/10.1080/10426914.2014.973595>.

20. Rowe W. B. Principles of modern grinding technology.

2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014. 480 p.

21. Kim C. S., Massa T. R., Rohrer G. S. Modeling the relationship between microstructural features and the strength of WC–Co composites // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2006. Vol. 24. Iss. 1-2. P. 89–100. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2005.04.011>.

References

1. Wang Gang, Shan Yan. Compensation of electrode orbiting in electrical discharge machining based on non-uniform offsetting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. Iss. 14. P. 1628–1634. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.023>.

2. Sadollah Bamerni Z., El-Hofy H. Orbital electrochemical machining of electrodischarge machined surfaces. In: Kulianic E. (eds.). *AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures)*. Vol. 437. Vienna: Springer; 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2555-7_51.

3. Hai Peng Huang, Guan Xin Chi, Zhen Long Wang. Multi-axis EDM CNC system based on RT-Linux. In: Su Daizhong, Zhang Qingbin, Zhu Shifan (eds.). *Key Engineering Materials*. Vol. 419–420. Trans Tech Publications Ltd; 2009, p. 809–812. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.809>.

4. Ibragimova L. I., Yenikeev B. A., Akmaev O. K. Kinematic analysis of an electroerosion 5-axis machine tool with parallel kinematics. In: *Stankostroyeniye i innovatsionnoye mashinostroyeniye. Problemy i tochki rosta: materialy Vserossiyskoy nauchnotekhnicheskoy konferencii = Machine-Tool Building and Innovative Mechanical Engineering. Problems and Points of Growth 2018: materials of All-Russian scientific and technical conference*. 28 February – 1 March, 2018, Ufa. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2018, p. 315–321. (In Russ.).

5. Kratyuk N. A. Determination of optimal method of making of small diameter deep holes in parts of gas-turbine engine and its experimental study. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo mashinostroyitel'nogo universiteta «MAMI» = Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;2(4):20–26. (In Russ.).

6. Sarilov M. Yu. The study of electrical discharge machining process. *Nauka i obrazovanie*. 2016;3:76–82. (In Russ.).

7. Smolentsev V. P., Koptev I. T., Gazizullin K. M. Technological possibilities and development prospect of electroerosion and electrochemical dimensional machining. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2012;2-2:49–56. (In Russ.).

8. Chen Jiang Hua, Bernaerts D., Seo Jin Won, Van Tendeloo G., Kagi H. Voidites in polycrystalline natural diamond. *Philosophical Magazine Letters*. 1998;77(3):135–140. <https://doi.org/10.1080/095008398178561>.

9. Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S., Popov A.Yu. Contemporary approach to technological preparation automation of the production. *Avtomatizatsiya i sovremennye*

tehnologii. 2011;4:39–43. (In Russ.).

10. Yanyushkin A. S., Lobanov D. V., Rychkov D. A. Software products to automate preparation of tool production at enterprises. *Polzunovskij al'manah*. 2008;4:214–216. (In Russ.).

11. Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Shnajder D. A., Yanyushkin A.S. Experience of electric erosion milling at JSC "Cheboksary Electrical Apparatus Plant". *Aktual'nye problemy v mashinostroyenii = Actual Problems in Machine Building*. 2021;8(3-4):57–62. (In Russ.).

12. Yanyushkin A. R., Lobanov D. V., Tatanov P. V. Improving the process of electro-diamond grinding. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoj promyshlennosti: materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov = Electrophysical processing methods in modern industry: materials of IV International scientific and practical conference of young scientists, postgraduate students and students*. 14–15 December 2020, Perm'. Perm': Perm National Research Polytechnic University; 2021, p. 144–148. (In Russ.).

13. Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Sherov K. T., Yanyushkin A. S. Use of the secondary resource of hard-alloy replaceable multi-face plates in metalworking. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2021;1:85–96.

14. Yanyushkin A. S., Baranov A. N., Losev A. B., Yakimov S. A. Investigating possibility to replace electrolytes during electro-diamond treatment with conventional lubricating and cooling technical media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2007;1(2):25–30.

15. Yanushkin A. S., Rychkov D. A., Lobanov D. V., Petrov N. P. Methods of cutting tool database formation. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2013;1:143–146. (In Russ.).

16. Popov V. Yu., Yanyushkin A. S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels. *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*. 2012;4(1):91–102.

17. Skeebe V. Yu., Ivancivsky V. V., Kutyskin A. V., Parts K. A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;126:012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012016>.

18. Zamashchikov Y. I. Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress. *Materials and Manufacturing Processes*. 2006;21(5):551–566.

<https://doi.org/10.1080/10426910500471706>.

19. Skeeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015;30(12):1408-1411. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.973595>.

20. Rowe W. B. *Principles of modern grinding technology*.

2nd ed. Oxford: Elsevier; 2014. 480 p.

21. Kim C. S., Massa T. R., Rohrer G. S. Modeling the relationship between microstructural features and the strength of WC-Co composites. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2006;24(1-2):89-100. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2005.04.011>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Татанов Петр Владимирович,

аспирант,

Чувашский государственный университет

им. И. Н. Ульянова,

428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Янюшкин Андрей Романович,

магистрант,

Чувашский государственный университет

им. И. Н. Ульянова,

428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Шнайдер Дмитрий Александрович,

аспирант, инженер,

Чувашский государственный университет

им. И. Н. Ульянова,

428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Янюшкин Александр Сергеевич,

доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Технология машиностроения»,

главный научный сотрудник,

Чувашский государственный университет

им. И. Н. Ульянова,

428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.08.2021; одобрена после рецензирования 07.09.2021; принята к публикации 25.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petr V. Tatanov,

Postgraduate Student,

I. N. Ulianov Chuvash State University,

15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Andrey R. Yanushkin,

Master's Degree Student

I. N. Ulianov Chuvash State University,

15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Dmitriy A. Schneider,

Postgraduate Student, Engineer,

I. N. Ulianov Chuvash State University,

15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Alexander S. Yanyushkin,

Dr. Sci. (Eng.) Professor,

Professor of the Department of Machine-Building Technology,

Chief Researcher,

I. N. Ulianov Chuvash State University,

15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 25.08.2021; approved after reviewing 07.09.2021; accepted for publication 25.10.2021.