

Ширяев В.В., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Пустовалов Д.О., Смоленцев Е.В. Влияние микроструктуры электрода-инструмента на эффективность процесса электроэрозионной обработки материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 75–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.09

Shiryayev V.V., Ablyaz T.R., Schlykov E.S., Pustovalov D.O., Smolentsev E.V. The influence of the microstructure of the electrode-tool on the efficiency of edm materialsprocess. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 75–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.09

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 2, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.09

УДК 621.9.048.4

**В.В. Ширяев<sup>1</sup>, Т.Р. Абляз<sup>1</sup>, Е.С. Шлыков<sup>1</sup>,  
Д.О. Пустовалов<sup>1</sup>, Е.В. Смоленцев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Обеспечение заданной производительности электроэрозионной обработки при минимальном износе электрода-инструмента является актуальной научно-технической задачей, определяющей эффективность технологического процесса. Целью работы является изучение влияния структуры электрода-инструмента на эффективность эрозионной обработки материалов. В основе технологического процесса обработки заготовок электроэрозионными методами лежит физическое воздействие на обрабатываемую поверхность импульсов электрических разрядов. От физико-механических свойств электрода-инструмента и электрода-детали зависят выходные параметры процесса обработки. На основе проведенных литературных исследований установлено, что обеспечение равномерной структуры материала электрода-инструмента позволяет повысить его эксплуатационные характеристики. Более эффективную электроэрозионную обработку металла можно осуществлять при получении электрода-инструмента с заданной, направленной структурой. Одним из основных параметров, влияющих на электроэрозионные свойства инструмента, является электропроводность. Электрические характеристики электрода-инструмента оказывает активное влияние на изменение электрических характеристик. От исходной структуры электрода-инструмента зависит и характер его эрозионного разрушения, и характер эрозионного разрушения обрабатываемого материала, однако у этих процессов существуют принципиальные различия. При повышении энергии единичного импульса скорость эрозионного разрушения электрода носит выраженный немонотонный характер, тогда как монотонно возрастает скорость объемного съема обрабатываемого материала. Для исследования влияния микроструктуры материала электродов на процесс эрозионной обработки было получено три вида литых заготовок из латуни ЛЦ40С, два из которых были получены с применением холодильников. По результатам металлографического анализа можно заключить, что применение холодильников позволило получить микроструктуру с преобладающей столбчатой структурой. Было выполнено по три реза каждым электродом. В результате микроструктура с преобладающей столбчатой структурой, полученная с применением холодильников, позволила получить более высокие показатели по эффективности процесса эрозионной обработки. При использовании электродов, полученных по технологии, обеспечивающей более высокую электропроводность и более высокую микротвердость, технологическое время уменьшается.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, эксперимент, производительность, микроструктура, точность, качество, погрешность, импульс, микротвердость.

**V.V. Shiryayev<sup>1</sup>, T.R. Ablyaz<sup>1</sup>, E.S. Schlykov<sup>1</sup>, D.O. Pustovalov<sup>1</sup>, E.V. Smolentsev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

**THE INFLUENCE OF THE MICROSTRUCTURE OF THE ELECTRODE-TOOL  
ON THE EFFICIENCY OF EDM MATERIALSPROCESS**

Ensuring a given performance of electrical discharge machining with minimal wear of the electrode tool is an urgent scientific and technical task that determines the efficiency of the process. The aim of the work is to study the influence of the structure of the electrode-tool on the efficiency of erosion treatment of materials. The technological process of processing workpieces by electroerosion methods is based on the physical effect of electric discharge pulses on the surface being treated. The output parameters of the processing process depend on the physicomaterial properties of the electrode-tool and the electrode-part. Based on the literature, it was found that ensuring a uniform structure of the material of the electrode-tool allows you to increase its operational characteristics. A more efficient electrical discharge machining of the metal can be carried out upon receipt of an electrode-tool with a given directional structure. One of the main parameters affecting the electrical discharge properties of an instrument is electrical conductivity. The electrical characteristics of the electroerosion process of material processing affect the productivity

and quality of processing. The microstructure of the electrode-tool has an active influence on their change in electrical characteristics. The nature of its erosive destruction and the nature of erosive destruction of the processed material depend on the initial structure of the electrode-tool, however, these processes have fundamental differences. With an increase in the energy of a single pulse, the rate of erosive destruction of the electrode has a pronounced non-monotonic character, while the rate of volumetric removal of the processed material monotonously increases. In the work, to study the influence of the microstructure of the electrode material on the process of erosion treatment, three types of cast billets made of brass LC40S were obtained, two of which were obtained using refrigerators. According to the results of metallographic analysis, we can conclude that the use of refrigerators made it possible to obtain a microstructure with a predominant columnar structure. Three cuts were made with each electrode. As a result, the microstructure with a predominant columnar structure, obtained using refrigerators, allowed to obtain higher rates for the efficiency of the erosion treatment process. When using electrodes obtained by technology that provides higher electrical conductivity and higher microhardness, the technological time is reduced.

**Keywords:** electric discharge machining, power tool, experiment, productivity, microstructure, accuracy, quality, error, impulse, microhardness.

### Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) – один из способов изменения размеров и форм заготовок из токопроводящих материалов [1]. Технология позволяет формировать сложнопрофильные сквозные или глухие элементы на обрабатываемых заготовках [2].

В основе электроэрозионной обработки лежит воздействие электрических разрядов на заготовку. Материал на поверхности заготовки расплавляется и удаляется из зоны обработки [3, 4]. На рис. 1 представлен принцип электроэрозионной обработки: источник импульсов электрического напряжения создает часто повторяющиеся электрические заряды, в результате чего при их прохождении в зазоре  $\delta$  происходит разрушение электродов 1 и 2, которые находятся в ванне, наполненной токопроводящей жидкостью 3. Один из электродов оказывает поступательное движение  $D_s$  в направлении другого электрода, который, в свою очередь, неподвижно закреплен [4–8]. Этот метод в 1943 г. был предложен советскими учеными Н.И. Лазаренко и Б.Р. Лазаренко [5].

В промежутке между электродами (межэлектродном промежутке) протекают процессы, определяемые физическими явлениями прохождения между электродами импульсов электрического тока. Электроды 1 и 2 имеют шероховатые поверхности. При их сближении всегда находится два выступа микронеровностей, расположенных на наименьшем расстоянии  $\delta_{\min}$  (см. рис. 1, а). В определенный мо-

мент сближения электродов разность потенциалов  $U$  между близко расположенными выступами оказывается достаточной для ионизации молекул диэлектрической жидкости 3. Вышедшие с орбит атомов электроны устремляются к аноду, а образовавшиеся положительно заряженные ионы – к катоду. Образуется токопроводящий канал 4 (см. рис. 1, а). Электроны, двигаясь с высокой скоростью, соударяются с неионизированными молекулами жидкости, выбивая новые электроны и тем самым усиливая ток электрического разряда (см. рис. 1, б). Эта стадия процесса именуется фазой (стадией) искрового разряда. По образовавшемуся токопроводящему каналу за время  $10^{-8}$ – $10^{-2}$  с протекает импульс тока большой плотности ( $\rho I = 8 \dots 10$  кА/мм<sup>2</sup>), что вызывает расширение канала разряда 5 (см. рис. 1, б) и рост температуры до 8000–10 000 градусов в канале и на его площадках контакта с электродами.

Жидкость в межэлектродном зазоре нагревается до температуры кипения, и образуется газовый пузырь 6 из паров жидкости (см. рис. 1, в). Далее электрический разряд развивается в газовой среде, что приводит к интенсивному локальному разогреванию детали, приповерхностные слои материала плавятся и продукты расплава в виде шариков застывают 7 в проточной жидкости и выносятся из зоны обработки [9].

На рис. 2 представлена схема электроэрозионной обработки заготовки. На этой схеме изображен процесс прошивания отверстия электродом-инструментом 3 в электроде-заготовке 5, помещенной в диэлектрической жидкости 4. Между

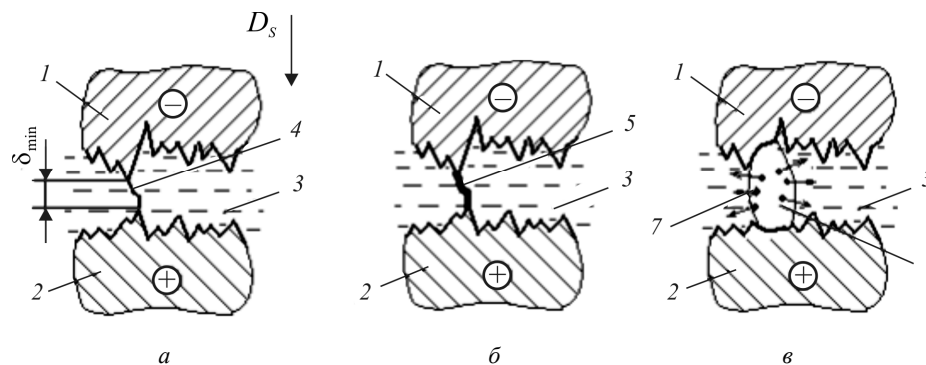


Рис. 1. Этапы возникновения и развития электрического разряда

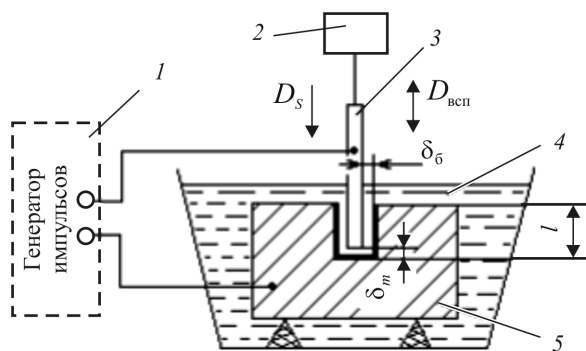


Рис. 2. Схема электроэрозионной обработки

электродом-инструментом и заготовкой выдерживается постоянный межэлектродный зазор  $\delta_m$ , постоянство которого обеспечивается следящей системой 2 [8–10].

Один из основных параметров, влияющих на электроэрозионные свойства электрода-инструмента, – это его структура [11–15]. Соответственно, более эффективную электроэрозионную обработку можно осуществлять при получении электрода-инструмента с заданной, направленной структурой [16–18]. Значительно повысить эффективность в этом случае позволит лучшая электропроводность [17, 19].

Электрические характеристики эрозионного процесса влияют на производительность и качество обработки токопроводящих материалов. Микроструктура электрода-инструмента способна оказать активное влияние на эти характеристики [17].

Начало искрового и дугового процессов определяется способностью материала испускать свободные электроны, которые попадают в межэлектродное пространство. В результате чего происходит его ионизация и наводится канал проводимости, который оказывает влияние на развитие искрового и дугового разрядов [17]. Чем выше плотность дефектов кристаллического строения электрода-инструмента, тем выше его способность испускать свободные электроны (эмиссионная активность), в результате чего увеличивается стабильность и мощность искрового и дугового разрядов. Таким образом объясняется влияние микроструктуры электрода-инструмента на характер искрового и дугового процессов [17–19].

Технологическое время электроэрозионной обработки уменьшалось с повышением энергии импульса при использовании электродов-инструментов, которые были изготовлены по технологиям, обеспечивающим более высокую микротвердость. Следовательно, технологическое время увеличивалось при использовании мягких электродов-инструментов [20–24].

От исходной структуры электрода-инструмента зависит и характер его эрозионного разруше-

ния, и характер эрозионного разрушения обрабатываемого материала, однако у этих процессов существуют принципиальные различия. При повышении энергии единичного импульса скорость эрозионного разрушения электрода носит выраженный немонотонный характер, тогда как монотонно возрастает скорость объемного съема обрабатываемого материала. Скорость эрозионного разрушения электрода-инструмента и скорость объемного съема обрабатываемого материала тем выше, чем выше твердость электрода-инструмента [17].

Повышенная плотность дефектов кристаллического строения оказывает влияние на повышение скорости разрушения твердых электродов-инструментов. Следствием чего является как снижение эрозионной стойкости, так и более низкая энтальпия плавления [17, 19].

В работе [17] отмечено, что скорость объемного съема обрабатываемого материал возрастает, тогда как скорость эрозии электрода инструмента снижается. Эта закономерность объясняется тем, что искровой заряд происходит при определенном межэлектродном зазоре, величина которого зависит от пробивного напряжения диэлектрической среды. Истинная продолжительность разряда определяется падением напряжения до пробивного. При наличии в межэлектродном зазоре эрозионных частиц величина пробивного напряжения резко снижается и становится зависимой не только от диэлектрических свойств среды, но и от концентрации активных эрозионных частиц. С учетом того, что эрозионные частицы находятся в ионизированном состоянии, электрическое сопротивление межэлектродного зазора снижается, что приводит к повышению силы тока [17, 19].

Соответственно, сила тока и мощность искрового заряда повышаются при повышении концентрации в межэлектродном пространстве продуктов эрозии [17, 19, 21].

На скорость разрушения электрода-инструмента при процессе эрозионной обработки также влияет скорость съема обрабатываемого материала [19–24]. Вероятность осаждения продуктов эрозии обрабатываемого материала на электроде-инструменте тем выше, чем больше их производится в процессе обработки [17, 19].

Термические процессы отпуска, оказывающие влияние на снижение плотности дефектов кристаллического строения поверхностных структур, которые подлежат эрозионному разрушению, приводят к повышению скорости съема обрабатываемого материала с увеличением энергии искрового импульса [17, 19].

Обеспечение заданной производительности электроэрозионной обработки при минимальном

износе электрода-инструмента является актуальной научно-технической задачей, определяющей эффективность технологического процесса.

Целью работы является изучение влияния структуры электрода-инструмента на эффективность эрозионной обработки материалов.

### Материалы и методы исследования

С целью исследования влияния микроструктуры материала электродов-инструментов на процесс эрозионной обработки получено три вида литых заготовок из латуни марки ЛЦ40С (ГОСТ 24301–93):

1) с использованием стального холодильника для обеспечения неравномерности теплоотвода от поверхности;

2) с использованием бронзового холодильника для обеспечения неравномерности теплоотвода от поверхности;

3) полученный без применения средств технологического воздействия, оказывающих влияние на конечную структуру.

Модель литой заготовки формовалась в песчано-глинистой смеси. Приготовление расплава ЛЦ40С осуществлялось в индукционной печи УИП-16-10-0, 01-УХЛ14 фирмы RELTEC в корундовом тигле.

Полученные литые заготовки были очищены и разрезаны: цилиндр распиливали с помощью абразивного круга по центральной оси на две равные половины.

Для проведения металлографического анализа полученных электродов была использована следующая методика: шлифование производили последовательно наждачной бумагой различного сорта; полирование производили вручную при помощи полировального материала, на который периодически наносили полировальную пасту ГОИ на основе оксида хрома (III). В качестве реактива для травления поверхности шлифов опытным путем был подобран раствор следующего состава: I<sub>2</sub> (йод кристаллический) – 1 г; KI (йодистый ка-

лий) – 2 г; H<sub>2</sub>O (вода) – 100 мл; C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (этиловый спирт) – 100 мл. Шлифы были погружены в данный реактив на 3 мин, после чего их микроструктура стала отчетливо видна при помощи микроскопа Olympus GX51.

Для оценки производительности и стойкости электродов был проведен ряд экспериментов. В качестве обрабатываемого материала выбрана жаропрочная высоколегированная сталь ЭП517-Ш. Электроэрозионная обработка проходила на копировально-прошивном электроэрозионном станке Electronica Smart CNC. Рабочая жидкость – масло И-20А. Режимы электроэрозионной обработки регулировались программным кодом E51 (представлены ниже).

#### Режим электроэрозионной обработки

Сила тока, А	Напряжение, В	Время действия импульса, мкс
8	50	100

Измерение износа электрода-инструмента и глубины прожига осуществлялось при помощи измерительной машины Carl Zeiss Contura G2.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены результаты металлографического анализа электродов. Показано, что применение холодильников позволило получить микроструктуру с преобладающей столбчатой структурой, с удлинением зерна примерно в 4 раза. Гипотетически удлиненная структура позволит оказать положительное влияние на эффективность ЭЭО, так как при получении электродов-инструментов с заданной, направленной структурой улучшается их электропроводность [17–19].

Для определения износа ЭИ и производительности ЭЭО проведены экспериментальные исследования на режимах, приведенных выше. Время обработки составляло 15 мин. Каждый эксперимент повторялся 3 раза. На рис. 4 представлены результаты проведенных экспериментов.

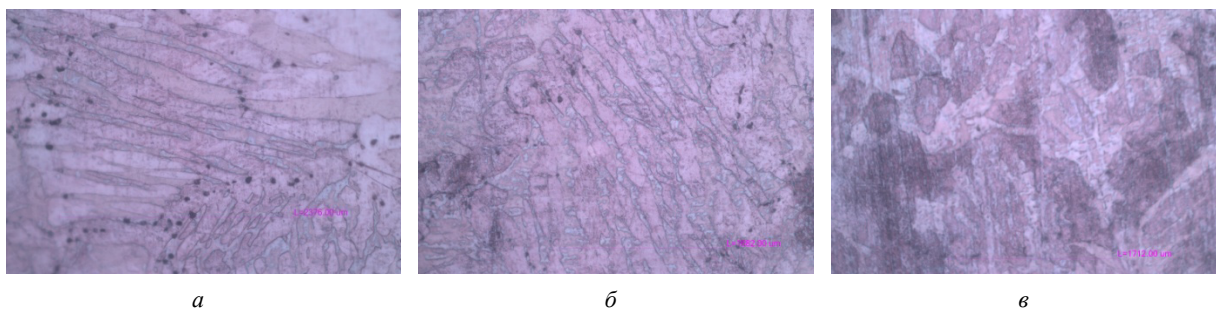


Рис. 3. Результаты металлографического анализа: а – микроструктура шлифа образца из сплава ЛЦ40С, полученного с применением холодильника из стали; б – бронзы; в – без холодильника

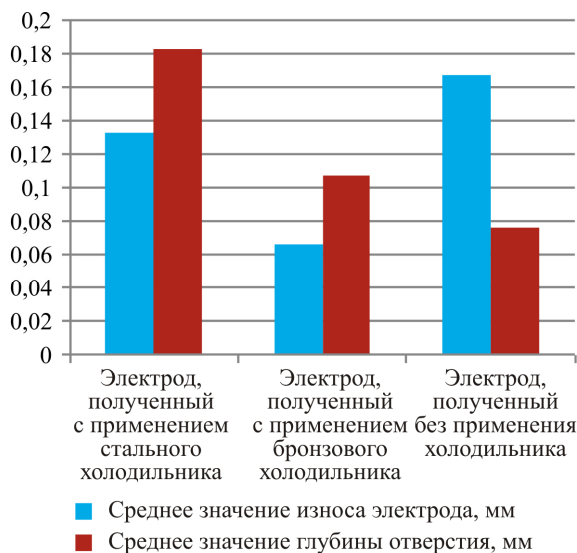


Рис. 4. Результаты ЭЭО разнородными электродами

Для оценки полученных значений применяется коэффициент эффективности  $k$ :

$$k = \frac{\text{Глубина отверстия}}{\text{Износ электрода}}$$

Отмечено, что электрод-инструмент, полученный без применения средств технологического воздействия (оказывающих влияние на конечную структуру металла), характеризуется повышенным износом и меньшей производительностью обработки. Коэффициент эффективности составляет  $k = 0,46$ . Наибольший коэффициент эффективности соответствует ЭИ, полученному с применением бронзового холодильника ( $k = 1,61$ ). Таким образом, подтверждается гипотеза влияния структуры ЭИ на процесс ЭЭО.

### Выводы

Установлено, что на эффективность процесса ЭЭО влияет не только марка материала электрода-инструмента, но также и его внутренняя структура. Отмечено, что электроды с равномерной структурой позволяют обеспечить стабильность процесса резания при повышенных показателях производительности.

Электроды-инструменты с преобладающей столбчатой структурой, полученные с применением холодильников, обеспечивают более высокие показатели производительности процесса эрозионной обработки.

Показано, что электроды-инструменты, полученные методом литья с применением холодильников, характеризуются повышенной электропро-

водностью и наибольшей электроэрозионной стойкостью электрода-инструмента.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028.*

### Список литературы

1. Саврилов М.Ю., Линеев А.С. Электроэрозионная обработка алюминиевых и титановых сплавов: учеб. пособие // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 5. – С. 67–68.
2. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Состояние и перспективы развития наукоемких технологий машиностроительного производства // Металлообработка. – 2010. – № 2. – С. 9–17.
3. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
4. Смоленцев В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 1. – 247 с.
5. Никифоров В.И. Электрохимические и электрофизические технологии в машиностроении. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 302 с.
6. Савицкий В.В. Электроэрозионные методы обработки материалов: учеб. пособие для вузов / ВГТУ. – Витебск, 2006. – 276 с.
7. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1989. – 167 с.
8. Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 120 с.
9. Елисеев Ю.С., Савушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Савушкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.
10. Электрофизические и электрохимические методы обработки: учеб. пособие / З.И. Поляков, В.М. Исаков, Д.В. Исаков, В.Ю. Шамин / ЮУрГУ. – Челябинск, 2006. – 89 с.
11. Гришарин А.О., Абляз Т.Р., Оглезнев Н.Д. Повышение эффективности электроэрозионной обработки деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения путем применения электродов-инструментов с повышенными электроэрозионными свойствами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2017. – Т. 19, № 3 – С. 151–162.
12. Солнцев Б.П. Материаловедение. – М.: Химиздат, 2007. – 784 с.
13. Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М. Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. – М.; Л.: Машиностроение, 1964. – 448 с.
14. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высш. шк., 1974. – 590 с.

15. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.
16. Резников Н.И., Черемисин А.С. Физические особенности процесса резания, обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов // Исследование обрабатываемости жаропрочных титановых сплавов. – Куйбышев, 1973. – С. 5–17.
17. Бутин А.В., Ким В.А., Злыгостев А.М. Исследование эрозионной стойкости медного электрода инструмента при электроэрозионной обработке титановых сплавов // Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике: тез. докл. 3-й конкурс. конф., г. Королев, 18–21 июня, 2004 г. – Королев, 2004. – С. 27–30.
18. Temborius S., Lindmayer M., Gentsch D. Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions // XIX Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 18–22 September 2000. – 2000. – Vol. 2. – P. 519–523.
19. Ким В.А., Бутин А.В. Роль вторичных структур на рабочих поверхностях медного электрода-инструмента при электроискровом прошивании титанового сплава // Металлообработка. – 2005. – № 5. – С. 8–9.
20. Gentsch D. Contact material for vacuum interrupters based on cuCr with a specific high short circuit interruption ability // XXII Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 21–23 October 2006. – 2006. – Vol. 2. – P. 437–422.
21. Лазерное упрочнение твердого сплава / В.А. Ким, С.П. Мазур, А.В. Бутин, В.М. Воронов // Вестник Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-та. – 2004. – Сб. 2, ч. 1. – С. 39–44.
22. A novel tool design procedure for arc sweep machining technology / L. Gu, A. Farhadi, Y. Zhu, G. He, W. Zhao, K. Rajurkar // Materials and Manuf. Proc. – 2020. – Vol. 2 – P. 113–121.
23. Miao B., Zhang Ya., Guoxun Liu. Current status and developing trends of Cu–Cr contact materials for VCB // XXIth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 26–29 January 2004. – 2004. – Vol. 2. – P. 311–314.
24. Hybrid EDM and grinding hard materials using a metal matrix composite electrode / K.M. Shu, H.R. Shih, W.F. Lin, G.C. Tu // ASME 7<sup>th</sup> Biennial Conf. on Eng. Systems Design and Analysis. 15–19 October 2004. – 2004. – Vol. 3. – P. 247–254.
3. Foteev N.K. Tekhnologiya elektroerozionnoi obrabotki [Electrospray technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 184 p.
4. Smolentsev V.P. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical methods of material processing]. Moscow: Vysshaya shkola, 1983, vol. 1, 247 p.
5. Nikiforov V.I. Jelektrohimicheskie i elektrofizicheskie tehnologii v mashinostroenii. Saint-Petersburg [Electrochemical and electrophysical technologies in mechanical engineering]. Izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta Sankt-Peterburga, 2013, 302 p.
6. Savitskii V.V. Elektroerozionnye metody obrabotki materialov [Electroerosion methods of material processing]. Vitebsk: UO «VGTU», 2006, 276 p.
7. Nemilov E.F. Spravochnik po elektroerozionnoi obrabotke materialov [Handbook of electric discharge machining of materials]. Leningrad: Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie, 1989, 167 p.
8. Abliaz T.R., Khanov A.M., Khurmatullin O.G. Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to the technology of electroerosion processing of materials]. Perm: Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politeknicheskogo Universiteta, 2012, 120 p.
9. Eliseev Iu.S., Savushkin B.P. Elektroerozionnaia obrabotka izdeliia viatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosion processing of aerospace equipment products]. Ed. B.P. Savushkina. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 2010, 437 p.
10. Poliakov Z.I., Isakov V.M., Isakov D.V., Shamin V.Iu. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki [Electrophysical and electrochemical processing methods]. Cheliabinsk: IuUrGU, 2006, 89 p.
11. Grisharin A.O., Abliaz T.R., Ogleznev N.D. Increase of efficiency electrical discharge machining of details of hydraulic cylinders and products of special purpose by application of electrodes with the raised electrical discharge machining properties [Increase of efficiency of electroerosion processing of details of hydraulic cylinders and products of special purpose by application of electrodes-instruments with the raised electroerosion properties]. *Vestnik PNRPU*, 2017, vol. 19, no. 3, p. 151–162.
12. Solntsev B.P. Materialovedenie [Material Science]. Moscow: Khimizdat, 2007, 784 p.
13. Shifrin A.Sh., Reznitskii L.M. Obrabotka rezaniem korozionno-stoikikh, zharoprochnykh i titanovykh staley i splavov [Cutting of corrosion-resistant, heat-resistant and titanium steels and alloys]. Moscow: Leningrad: Mashinostroenie, 1964, 448 p.
14. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov [Cutting hard-to-machine materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974, 590 p.
15. Krivoukhov V.A., Chubarov A.D. Obrabotka rezaniem titanovykh splavov [Cutting of titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 180 p.
16. Reznikov N.I., Cheremisin A.S. Fizicheskie osobennosti protsessy rezaniia, obrabatyvaemost' zharoprochnykh i titanovykh splavov [Physical features of the cutting process, machinability of heat-resistant and titanium alloys. Issled-

## References

1. Sarilov M.Iu., Linev A.S. Elektroerozionnaia obrabotka aluminievyykh i titanovykh splavov [Electroerosion processing of aluminium and titanium alloys]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia*, 2013, no. 5, pp. 67–68.
2. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaia obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosion machining of aerospace equipment]. Ed. B.P. Sauschkina. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2010, 437 p.

vanie obrabatyvaemosti zharoprochnykh titanovykh splavov. Kuibyshev, 1973, p. 5-17.

17. Butin A.V., Kim V.A., Zlygostev A.M. Issledovanie erozionnoi stoikosti mednogo elektroda instrumenta pri elektroerozionnoi obrabotke titanovykh splavov [Investigation of the erosion resistance of the tool copper electrode during the electroerosion treatment of titanium alloys]. *Novyematerialy i tekhnologii v aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike; tezisy dokladov 3 konkursnoi konferentsii*. Korolev, 2004, p. 27-30.

18. Temborius S., Lindmayer M., Gentsch D. Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions. *XIX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 2000, vol. 2, pp. 519–523.

19. Kim V.A., Butin A.V. Rol' vtorichnykh strukturnarabochikh poverkhnostiakh mednogo elektroda-instrumenta pri elektroiskrovom proshivanii titanovogo splava [The role of secondary structures on the working surfaces of the copper electrode tool at electrospark piercing of titanium alloy]. *Metalloobrabotka*, 2005, no. 5, p. 8-9.

20. Gentsch D. Contact material for vacuum interrupters based on cuCr with a specific high short circuit interruption ability. *XXII International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 2006, vol. 2, pp. 437–442.

21. Kim V.A., Mazur S.P., Butin A.V., Voronov V.M. Lazernoe uprochnenie tverdogo splava [Laser hardening of hard alloy]. *Vestnik gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniia vysshego professional'nogo obrazovaniia «Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet»*, 2004, sbornik 2, chast 1, p. 39-44.

22. Lin Gu, Ahmad Farhadi, Yingmou Zhu, Guojian He, Wansheng Zhao & Kamlakar Rajurkar. A novel tool design procedure for arc sweep machining technology. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, Vol. 2, pp. 113-121.

23. Miao B., Zhang Ya., Guoxun Liu. Current status and developing trends of Cu-Cr contact materials for VCB. *XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 2004, vol. 2, pp. 311–314.

24. Kuen Ming Shu, Hung Rung Shih, Wen Feng Lin and G.C. Tu Hybrid EDM and grinding hard materials using a metal matrix composite electrode. *ASME 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2004, vol. 3, pp. 247–254.

Получено 24.04/2020

Опубликовано 30.06.2020

#### Сведения об авторах

**Ширяев Владислав Витальевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: vlad2117@gmail.com.

**Абляз Тимур Ризович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Lowrider11-13-11@mail.ru.

**Шлыков Евгений Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Lowrider11-13-11@mail.ru.

**Пустовалов Дмитрий Олегович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Lowrider11-13-11@mail.ru.

**Смоленцев Евгений Владиславович** (Воронеж, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель завкафедрой технологий машиностроения Воронежского государственного технического университета; e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com.

#### About the authors

**Vladislav V. Shiryayev** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: vlad2117@gmail.com.

**Timur R. Ablyaz** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Lowrider11-13-11-11@mail.ru.

**Evgeny S. Shlykov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Lowrider11-13-11@mail.ru.

**Dmitry O. Pustovalov** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Lowrider11-13-11@mail.ru.

**Evgeny V. Smolentsev** (Voronezh, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Engineering Technology, Voronezh State Technical University; e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com.