

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.3.09

УДК 621.74

А.О. Гришарин, Т.Р. Абляз, Н.Д. ОглезневПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОЦИЛИНДРОВ И ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Целью работы является повышение эффективности электроэрозионной обработки (ЭЭО) деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения (ГЦ и ИСН) путем применения электродов-инструментов (ЭИ) с повышенными электроэрозионными свойствами. Характерным признаком всех материалов, применяемых для изготовления деталей ГЦ и ИСН, является наличие в химическом составе сталей хрома. Наличие хрома повышает электроэрозионную стойкость материала, в связи с этим ЭЭО данных материалов сопровождается интенсивным износом ЭИ. Повышение износостойкости ЭИ является актуальной задачей. Известно, что при ЭЭО твердых и тугоплавких сплавов широко применяются ЭИ из композиционных материалов. В настоящее время разработаны композиционные материалы на основе меди, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства электрода-инструмента. Однако анализ литературы показал, что не в полной мере изучено влияние процентного содержания компонентов композиционного материала на производительность и стойкость ЭИ при ЭЭО хромосодержащих сталей. Для определения влияния процентного содержания компонентов композиционного материала на эксплуатационные свойства ЭИ был поставлен эксперимент по ЭЭО хромосодержащей стали Х12Ф ЭИ из композиционных материалов систем CuCr, CuW, CuMo, CuC с различным содержанием составляющих компонентов. Согласно поставленному эксперименту и последующему анализу установлено, что наиболее оптимальными показателями обладал электрод системы CuC с содержанием C 0,2 %. Представлены графики зависимостей свойств ЭИ от процентного содержания составляющих компонентов при ЭЭО хромосодержащей стали. Полученные результаты показывают целесообразность использования ЭИ из композиционного материала системы медь – графит с содержанием графита 0,2 % для обработки деталей ГЦ и ИСН.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, хромосодержащая сталь, электрод-инструмент, эксперимент, зависимость, износостойкость, производительность, композиционный материал, режимы обработки.

A.O. Grisharin, T.R. Ablyaz, N.D. Ogleznev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**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**

The purpose of the work is to increase the efficiency of the electrical discharge machining (EDM) of details of hydraulic cylinders and special-purpose products (hereinafter referred to as GC and ISN) by using electrodes (hereinafter EI) with increased EDM properties. All materials used for the manufacture of GZ and ISN parts is the presence of chromium steels in the chemical composition. The presence of chromium improves the EDM resistance of the material, in connection with this, the processing of these details is accompanied by intense wear of the EI. Increasing the wear resistance of EI is an urgent task. It is known that in EDM of hard and refractory alloys, EIs made of composite materials are widely used. At present, composite materials based on copper have been developed, which make it possible to improve the operational properties of the tool electrode. In spite of this, the use of such EI for EDM treatment of chromium-containing steels is not widely used. This is due to the fact that there are no practical recommendations on the use of these electrodes and the influence of the percentage content of the components of the composite material on the productivity and resistance of the EI in the treatment of chromium-containing steels has not been fully studied. To determine the influence of the percentage content of the components of the composite material on the performance properties of the EI, an experiment was conducted on the EDM treatment of chromium-containing steel X12F EI from the composite materials of the systems: copper-chromium; Copper-tungsten; Copper-molybdenum; Copper-graphite, with a different content of constituent components. According to the carried out experiment, and the subsequent analysis, it was established that the electrode of the copper-graphite system with 0.2% graphite content had the most optimal parameters. The received data allow show the expediency of the use of EI from the composite material of the copper-graphite system for machining the parts of the GC and ISN.

Keywords: electrical discharge machining, chrome-containing steel, electrode-tool, experiment, dependence, wear resistance, productivity, composite material, processing modes.

Мировая тенденция к снижению серийности изделий вынуждает предприятия быстро адаптироваться под изготовление новой продукции, что в первую очередь обеспечивается быстрой переналадкой производства. Для механической обработки пространственно-сложных деталей требуется дорогостоящая технологическая оснастка и инструмент, что становится серьезным препятствием в достижении поставленной цели. Актуальным решением является применение технологии электроэрозионной обработки (ЭЭО), позволяющей изготавливать сложнопрофильные изделия из труднообрабатываемых токопроводящих материалов [1].

В связи с конструктивными особенностями узлов гидроцилиндров и изделий специального назначения (далее – ГЦ и ИСН) многие детали, входящие в их состав, обладают сложной геометрией, имеют высокие требования к точности размеров и выполняются из труднообрабатываемых материалов (рис. 1). Поскольку механическая обработка таких деталей затруднительна, а в некоторых случаях невозможна, для обработки применяют электроэрозионный метод.



Рис. 1. Детали ГЦ и ИСН

Процесс ЭЭО заключается в постепенном расплавлении и испарении токопроводящих материалов под действием импульсов тока. Частицы материала, образующиеся в зоне обработки, вымываются за счет гидродинамических сил рабочей жидкости [2]. Преимущество ЭЭО перед механической обработкой заключается в возможности обработки электропроводных материалов любой твердости с обеспечением при этом высокой точности получаемой геометрии [3].

Установлено, что операция электроэрозионной обработки включена в технологический процесс изготовления 10 % всей номенклатуры деталей ГЦ и ИСН, а затраты на реализацию электроэрозионной

обработки могут достигать 40 % от всей стоимости технологического процесса изготовления детали.

Для электроэрозионной обработки деталей ГЦ и ИСН используют копировально-прошивные и проволочно-вырезные электроэрозионные станки.

В качестве электрода-инструмента (ЭИ) на проволочно-вырезных электроэрозионных станках используется латунная проволока диаметром от 0,25 мм. На копировально-прошивных электроэрозионных станках в качестве электрода-инструмента применяются сложнопрофильные медные электроды (рис. 2).

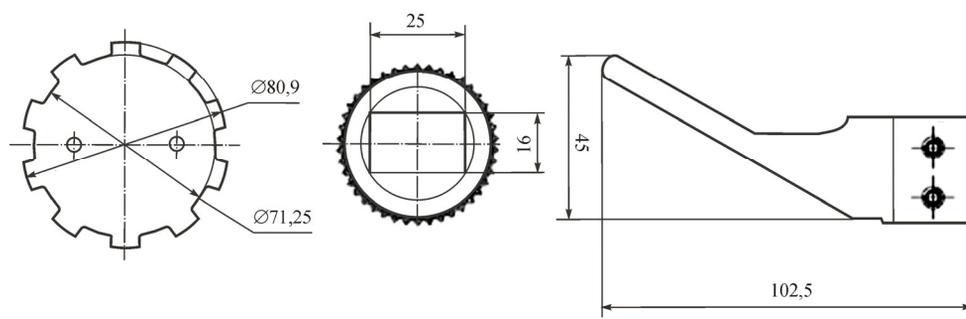


Рис. 2. Эскизы сложнопрофильных электродов

В связи с тем, что ЭИ являются одними из основных элементов электроэрозионного процесса, эффективность ЭЭО существенно зависит от их параметров. Стойкость ЭИ определяет точность обработки, а производительность в большей степени зависит от обрабатываемого материала [4]. Физико-механические свойства материала ЭИ, геометрические параметры ЭИ, а также режимы обработки являются основными факторами, влияющими на износостойкость ЭИ [5].

Для изготовления сложнопрофильных ЭИ достаточной точности применяют технологию проволочно-вырезной электроэрозионной резки. Из цельной заготовки вырезают требуемый контур электрода-инструмента на оборудовании предприятия. Такой подход делает процесс получения электрода достаточно дорогостоящим [6].

Анализ номенклатуры конструкционных материалов для деталей ГЦ и ИСН показал, что характерным признаком всех обрабатываемых материалов является наличие в химическом составе сталей хрома (07ХЗГНМЮА, 35ХГСА, ОХН1М, 38ХНЗМФА). Наличие хрома по-

вышает электроэрозионную стойкость обрабатываемых материалов. Обработка таких материалов приводит к интенсивному износу ЭИ [7].

С учетом всего вышесказанного актуальной задачей является повышение износостойкости ЭИ.

Одним из эффективных путей повышения износостойкости ЭИ становится применение композиционных материалов [2, 3, 8]. Широко используются ЭИ из композиционных материалов для обработки твердых и тугоплавких сплавов [9].

Для обеспечения требований к ЭИ наиболее предпочтительными являются композиционные материалы типа псевдосплава. Основным условием при выборе компонентов псевдосплава становится то, что один компонент должен обладать высокой электропроводностью, а второй должен быть механически прочным и более тугоплавким, чем первый. Компоненты псевдосплава практически не должны сплаиваться и взаимодействовать между собой в интервале температур, достигаемых в процессе ЭЭО [10]. Одним из основных путей получения ЭИ из композиционных материалов типа псевдосплава является метод порошковой металлургии.

При изготовлении ЭИ методами порошковой металлургии материал технологичен в том случае, когда он поставляется в виде порошка со средним размером частиц менее 40 мкм и фасонный ЭИ может быть изготовлен на серийно выпускаемом оборудовании, а значения основных технологических параметров удовлетворяют следующим требованиям: удельное давление формования менее 4 т/см², температура спекания (горячего прессования, обжига и т.д.) <1200 °С, время выдержки при температуре спекания (горячего прессования, обжига и т.д.) до 1 ч [11]. Метод порошковой металлургии позволяет варьировать химический состав, дисперсность и технологические параметры изготовления композиционных материалов для электрода-инструмента, позволяющие существенно повысить комплекс свойств материалов [12].

Установлено, что требования к ЭИ для ЭЭО схожи с требованиями, предъявляемыми к электроконтактам. Учитывая это, справедливо руководствоваться закономерностями для формирования структуры и механизмов работы материалов, применяемых для изготовления электроконтактов.

Для изготовления электроконтактов с высокой стойкостью к выгоранию широко применяются материалы на основе вольфрама и молибдена [13, 14].

Одним из разработанных материалов, применяемых для изготовления электроконтактов, требования к которым схожи с требованиями к ЭИ, является псевдосплав системы медь – хром. Данный материал показал ряд преимуществ по сравнению с известными [15, 16]. Медь выступает в качестве электропроводящего компонента, а хром обладает высокой твердостью.

Также перспективным композиционным материалом для ЭИ является псевдосплав системы медь – карбид кремния [17]. Карбид кремния можно использовать не только как тугоплавкий компонент псевдосплава, но и как основу для электрода с последующим нанесением на него медного покрытия. Нанесение медного покрытия на ЭИ из карбида кремния позволяет повысить электропроводность и уменьшить шероховатость поверхности [18].

Однако анализ литературы показал, что не в полной мере изучено влияние процентного содержания компонентов композиционного материала на производительность и стойкость электродов-инструментов при обработке хромсодержащих сталей.

Исходя из этого цель работы – исследование зависимости эксплуатационных свойств электродов-инструментов из композиционных материалов от процентного содержания компонентов тугоплавкой и легкоплавкой фаз при электроэрозионной обработке хромсодержащей стали.

Для проведения эксперимента были изготовлены электроды из композиционных материалов типа псевдосплава систем медь + хром (CuCr); медь + молибден (CuMo); медь + вольфрам (CuW); медь + коллоидный графит (CuC) с различным содержанием компонентов. Использовались порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60-75), хрома ПХ-1С (ГОСТ 14-1-1474-75), молибдена МПЧ (ТУ 48-19-69-80), вольфрама ПВ-0 (ТУ 48-19-101-84), сухого коллоидного графита марки С-1 (ТУ 113-08-48-63-90). Порошок меди смешивали с порошками тугоплавких компонентов, после чего из смесей прессовали образцы, затем образцы отжигали в вакуумной печи и проводили повторное прессование. Прессовки окончательно спекали в вакуумной печи при температуре 1100 °С в течение 2 ч. Исследование свойств ЭИ выполнялось при

ЭЭО листа 5,5 мм стали Х12Ф на электроэрозионном прошивном станке Smart CNC на черновых режимах.

Производительность определялась отношением времени обработки к объему выбранного материала ($\text{мм}^3/\text{мин}$). Относительный износ ЭИ определялся отношением глубины обработанного отверстия в стали к линейному износу ЭИ.

В результате эксперимента установлено, что наибольшей производительностью обладает электрод системы Cu–Mo (медь + молибден), с содержанием Mo 25 % (рис. 3), при этом относительный износ данного электрода в два раза ниже, чем у электрода из чистой меди (рис. 4).

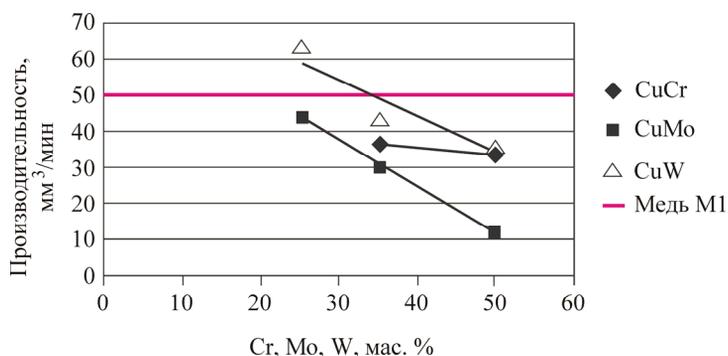


Рис. 3. Зависимость производительности ЭИ от количества тугоплавкой фазы

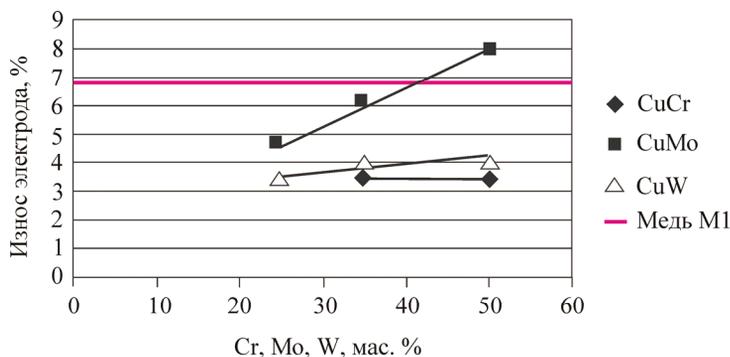


Рис. 4. Зависимость износостойкости ЭИ от количества тугоплавкой фазы

Самую высокую износостойкость показали электроды, изготовленные из смеси Cu–С (медь + коллоидный графит), однако при повы-

шении концентрации тугоплавкой фазы зафиксировано заметное падение производительности. Наиболее оптимальными показателями обладал электрод с содержанием С 0,2 %, его износостойкость оказалась в 2,5 раза выше, чем у электрода из чистой меди, при обеспечении производительности (рис. 5, 6).

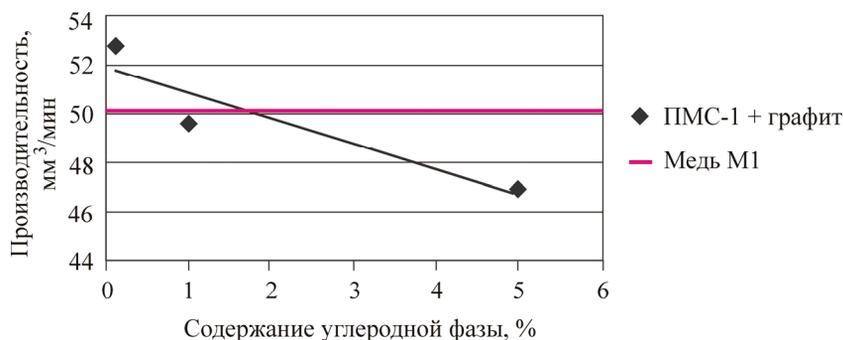


Рис. 5. Зависимость производительности ЭИ от количества тугоплавкой фазы

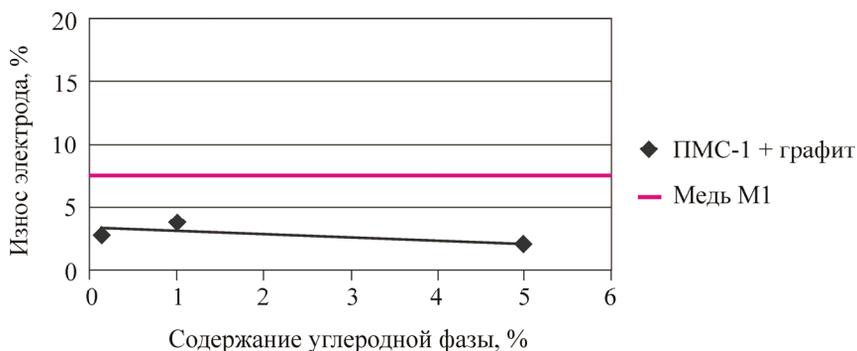


Рис. 6. Зависимость износостойкости ЭИ от количества тугоплавкой фазы

Таким образом, при исследовании зависимости эксплуатационных свойств электродов-инструментов из композиционных материалов от процентного содержания компонентов тугоплавкой и легкоплавкой фаз при электроэрозионной обработке хромсодержащей стали установлено, что наилучшим балансом свойств (износостойкость – производительность) обладал электрод, изготовленный из смеси медь + коллоидный графит с содержанием графита 0,2 %. Показана эффектив-

ность применения данных электродов для электроэрозионной обработки деталей ГЦ и ИСН.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-5310.2016.8.

Список литературы

1. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Состояние и перспективы развития наукоемких технологий машиностроительного производства // Металлообработка. – 2010. – № 2. – С. 9–17.
2. Смоленцев В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 1. – 247 с.
3. 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.
4. 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.
5. Съянов С.Ю. Определение остаточных напряжений, износа инструмента и производительности при электроэрозионной обработке // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 2(10). – С. 29–61.
6. Гришарин А.О., Абляз Т.Р. Анализ актуальных задач использования электроэрозионных технологий для изготовления деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016): материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 3–7 октября 2016 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 53–56.
7. Журин А.В. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2005. – 132 с.
8. Потапов В.А. Высокоскоростное фрезерование и электроэрозионная обработка: союзники или соперники [Электронный ресурс]. – URL: http://www.instrstan.com/text/text_38.html (дата обращения: 15.05.2017).
9. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 146 с.
10. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. – М.: Изд-во Мос. гос. индустр. ун-та, 1999. – 208 с.
11. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление и применение электродов-инструментов / под ред. А.Л. Лившица и А. Роша; Науч.-исслед. ин-т информации по машиностроению. – М., 1980. – 223 с.

12. Чернышев В.Г. Механохимическая обработка медных порошков, предназначенных для изготовления электродов-инструментов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2002. – 23 с.

13. 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. – P. 519–523.

14. Хоменко Е.В., Минакова Р.В. Перспективы развития разработок в области материалов для контактов вакуумных выключателей // Электрические контакты и электроды: сб. – Киев: Изд-во Ин-та проблем материаловедения НАН Украины, 1998. – 672 с.

15. 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. – P. 437–442.

16. 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. – P. 311–314.

17. Косолапова С.А. Повышение эффективности размерной электроэрозионной обработки пресс-инструмента на основе применения электродов-инструментов, изготовленных из композиционного материала Cu–SiC: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 1996. – 21 с.

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

References

1. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. Sostoianie i perspektivy razvitiia naukoemkikh tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva [State and prospects of development of high technologies of machine-building production]. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 2, pp. 9–17.

2. Smolentsev V.P. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical methods of processing of materials]. V 2 tomakh. Moscow: Vysshaya shkola, 1983, vol. 1, 247 p.

3. Eliseev Iu.S., Savushkin B.P. Elektroerozionnaya obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosive processing of products of the aerospace equipment]. Ed. B.P. Savushkina. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana, 2010, 437 p.

4. Abliaz T.R., Khanov A.M., Khurmatullin O.G. Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to technology of electroerosive processing of materials]: uchebnoe posobie. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 120 p.

5. S"ianov S.Iu. Opredelenie ostatochnykh napriazhenii, iznosa instrumenta i proizvoditel'nosti pri elektroerozionnoi obrabotke [Determination of residual tension, wear of the

tool and productivity at electroerosive processing]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 2(10), pp. 29–61.

6. Grisharin A.O., Abliaz T.R. Analiz aktual'nykh zadach ispol'zovaniia elektroerozionnykh tekhnologii dlia izgotovleniia detalei gidrotsilindrov i izdelii spetsial'nogo naznacheniiia [The analysis of relevant problems of use of electroerosive technologies for production of details of hydraulic cylinders and products of a special purpose]. *Innovationnye tekhnologii v materialovedenii i mashinostroenii (ITMM-2016): materialy 3-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Perm', 3–7 oktiabria 2016 g.* Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2016, pp. 53–56.

7. Zhurin A.V. Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke [Methods of calculation of technological parameters and electrodes tools at electroerosive processing]. Abstract of Ph.D. thesis. Tula, 2005, 132 p.

8. Potapov V.A. Vysokoskorostnoe frezerovanie i elektroerozionnaia obrabotka: soiuzniki ili soperniki [High-speed milling and electroerosive processing: allies or rivals]. Available at: http://www.instr-stan.com/text/text_38.html (accesses 15 may 2017).

9. Nemilov E.F. Spravochnik po elektroerozionnoi obrabotke materialov [Reference book on electroerosive processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 146 p.

10. Avraamov Iu.S., Shliapin A.D. Novye kompozitsionnye materialy na osnove nesmeshivaiushchikhsia komponentov: poluchenie, struktura, svoistva [New composite materials on the basis of immiscible components: receiving, structure, properties]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta, 1999, 208 p.

11. Elektroerozionnaia i elektrokhimicheskaiia obrabotka. Raschet, proektirovanie, izgotovlenie i primenenie elektrodov-instrumentov [Electroerosive and electrochemical processing. Calculation, design, production and application of electrodes tools]. Ed. A.L. Livshitsa i A. Rosha. Nauchno-issledovatel'skii institut informatsii po mashinostroeniiu. Moscow, 1980, 223 p.

12. Chernyshev V.G. Mekhanokhimicheskaiia obrabotka mednykh poroshkov, prednaznachennykh dlia izgotovleniia elektrodov-instrumentov [Mechanochemical processing of the copper powders intended for production of electrodes tools]. Abstract of Ph. D. thesis. Vladivostok, 2002, 23 p.

13. 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.

14. Khomenko E.V., Minakova R.V. Perspektivy razvitiia razrabotok v oblasti materialov dlia kontaktov vakuumnykh vykliuchatelei [The prospects of development of developments in the field of materials for contacts of vacuum switches]. *Elektricheskie kontakty i elektrody: sbornik*. – Kiev: Izdatel'stvo Instituta problem materialovedeniia NAN Ukrainy, 1998, 672 p.

15. 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.

16. 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.

17. Kosolapova S.A. Povyshenie effektivnosti razmernoi elektroerozionnoi obrabotki press-instrumenta na osnove primeneniia elektrodov-instrumentov, izgotovlennykh iz kompozitsionnogo materiala Cu–SiC [Increase in efficiency of dimensional electroerosive processing of the press tool on the basis of application of the electrodes tools made of the composite material Cu-SiC]. Abstract of Ph.D. thesis. Krasnoiarisk, 1996, 21 p.

18. 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 30.06.2017

Об авторах

Гришарин Антон Олегович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: a.grisharin@gmail.com.

Абляз Тимур Ризович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Оглезнев Никита Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: fastrex@mail.ru.

About the authors

Anton O. Grisharin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials, Technology and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: a.grisharin@gmail.com.

Timur R. Ablyaz (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Nikita D. Ogleznev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fastrex@mail.ru.