

УДК 621.9.048

doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-69-75

Исследование электроэрозионной обрабатываемости жаропрочных сплавов применительно к технологии прошивки отверстий малого диаметра

С.В. Кушнарченко¹, Ю.П. Астахов², А.О. Фомичев²

¹ АО НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко

² ФГУП «НПО Техномаш»

A Study of Electroerosive Machinability of Heat-Resistant Alloys in Relation to the Technology of Piercing Small Diameter Holes

S.B. Kushnarenko¹, Y.P. Astakhov², A.O. Fomichev²

¹ AO NPO Energomash named after Academician V. Glushko

² Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash

Рассмотрен способ получения и анализа единичной электроэрозионной лунки для группы жаропрочных хромоникелевых сплавов. Исследование геометрических параметров таких лунок позволяет рассчитать экспериментальным путем коэффициент эрозии обрабатываемого материала заготовки, характеризующий эффективность преобразования электрической энергии в работу разрушения твердого тела. При наложении на межэлектродный промежуток одиночного эрозионного импульса на поверхности электрода формируется единичная лунка. Геометрические параметры лунки (диаметр, глубина, высота буртика) зависят от многих факторов: энергии импульса, состава рабочей жидкости, материала электродов, межэлектродного промежутка и др. Выявлена зависимость объема удаленного материала от энергии импульса при прочих равных условиях. В соответствии с известной методикой проведены экспериментальные исследования, и получены фотографии единичных лунок при разной продолжительности импульса. Предложены модели шарового сегмента и эллипсоида для расчета объема удаленного металла. Показано, что наименьшую погрешность расчета дает модель шарового сегмента. По выбранной модели шарового сегмента рассчитан объем единичных лунок.

Ключевые слова: обрабатываемость материалов, коэффициент эрозии, электроэрозионная лунка, электрод-инструмент, электроэрозионная обработка, ракетно-космическая техника

This article presents a method of obtaining and analyzing a single electroerosion hole for a group of heat-resistant chromium-nickel alloys. The study of the geometric parameters of the hole allows us to calculate experimentally the coefficient of erosion of the work-piece material, which characterizes the efficiency of converting the electrical energy into the fracture work of a solid body. When a single erosion pulse is applied to the interelectrode gap, a single hole is formed on the electrode surface. The geometric parameters of

the hole (diameter, depth, height of the collar) depend on many factors: the pulse energy, the composition of the working fluid, the material of the electrodes, the value of the interelectrode gap, etc. This study establishes the dependence of the volume of the removed material on the pulse energy, with other conditions being equal. Experimental studies are conducted in accordance with a well-known method, and photographs of individual holes are obtained for different pulse durations. Ball segment and ellipsoid models are proposed for calculating the volume of the removed metal. It is shown that the ball segment model yields the smallest calculation error. The volume of individual holes is calculated using the selected ball segment model.

Keywords: machinability of materials, erosion coefficient, electroerosion hole, electrode-tool, electroerosion processing, rocket and space technology

Обрабатываемость материала — одно из важнейших технологических свойств, характеризующее совокупность качеств, определяющую его способность поддаваться обработке режущими инструментами.

В то же время обрабатываемость металла резанием отражает его способность ограничивать производительность обработки, вызывать затруднения в обеспечении требуемой точности и качества полученной поверхности, требовать специальных приспособлений для резания и вносить различные трудности в рабочий процесс. Очевидно, что обрабатываемость материала при электроэрозионной обработке (ЭЭО) имеет аналогичное значение [1, 2].

Известно, что жаропрочные сплавы плохо обрабатываются резанием вследствие низкого коэффициента обрабатываемости (0,05...0,10). Поэтому для получения изделий из этих материалов используют различные методы физико-химической обработки. Высокие показатели точности и качества обеспечивают операции ЭЭО.

Для проектирования таких операций необходимы справочные данные, в частности, значения коэффициента эрозии, которые отсутствуют в справочной литературе. В немногочисленных научных публикациях по этому вопросу приведены неоднозначные или мало достоверные результаты [3, 4].

Цель работы — уточнить значения коэффициента эрозии материала для жаропрочных хромоникелевых сплавов ХН58МБЮД, ЖС32, ЖС6У и ХН52КВМТЮБ.

Несмотря на большой объем исследований, посвященных этой теме, справочные значения этой величины не конкретизированы, предложен лишь диапазон ее изменения для отдельных групп материалов. Точное значение коэффициента эрозии k_m исследуемого металла требуется для сравнения экспериментальных и

теоретических (расчетных) данных при оценке ее влияния на технологические характеристики операций электроэрозионной прошивки современных образцов авиационной и ракетно-космической техники [5, 6].

Экспериментальные исследования проводили по апробированной методике получения и анализа объема единичной электроэрозионной лунки, разработанной и развитой отечественными учеными Б.Н. Золотых и Б.И. Ставицкими [7, 8].

Сущность методики экспериментальных исследований заключается в том, что в межэлектродном промежутке, заполненном жидкой диэлектрической средой, между исследуемым электродом и противэлектродом при фиксированных параметрах режима (материалах электродов, составе рабочей жидкости, межэлектродном зазоре, напряжении холостого хода, форме и длительности разрядного импульса) осуществляется единичный электрический разряд с подачей импульса напряжения от специального генератора.

В результате электрической эрозии на поверхности исследуемого электрода формируется единичная эрозионная лунка, геометрические параметры которой измеряют на микроскопе для последующего расчета объема лунки.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований в качестве базы выбран электроэрозионный прошивочный станок ЭПП-8, внешний вид которого показан на рис. 1.

Выбор этого оборудования обусловлен его специализацией на прошивке отверстий малого диаметра (0,1...2,0 мм), которые наиболее распространены в деталях ракетно-космической техники. Станок ЭПП-8 имеет диапазон режимов обработки, требуемый для прошивки отверстий малого диаметра.



Рис. 1. Внешний вид станка ЭПП-8

Техническая характеристика станка ЭПП-8

Диаметр прошиваемого отверстия, мм	0,1...2,0
Максимальные размеры детали, мм:	
диаметр	35
длина	55
Вместимость ванны, л	2
Рабочая жидкость	Техническая вода
Электрическая сеть	Трехфазная
Напряжение между электродами, В	20...150
Ток, А	0,5...5,0
Длительность импульса, мкс	0,4...2,8
Габаритные размеры, мм:	
длина	1200
ширина	1150
высота	1530

На используемом для проведения экспериментов оборудовании (см. рис. 1) параметры режима обработки задают путем регулирования длительности импульса и амплитуды напряжения. Однако для определения коэффициента эрозии k_m необходимо знать энергию импульса. Так как ее не задают в явном виде на оборудовании, энергию импульса измеряют посредством осциллографирования с помощью осциллографа TDS 2012C фирмы Tektronix и специального шунта. Осциллограф подключают по схеме, показанной на рис. 2.

С первого информационного провода 3 осциллограф 1 снимает осциллограмму напряжения, со второго 8 — осциллограмму падения напряжения на шунте. По характеру осциллограммы тока и падения напряжения на шунте идентичны, первая отличается от второй только масштабом. В соответствии с законом Ома для получения нужного масштаба необходимо осциллограмму падения напряжения уменьшить в 0,6 раз (сопротивление специального шунта). Общий провод 2 служит экраном, защищает от помех и замкнут на корпус осциллографа.

Основной частью специального шунта 5 сопротивлением $1,75 \cdot 10^{-3}$ Ом является тонкая медная пластина, которая определяет его сопротивление. К ней припаяны толстые медные пластины для удобства включения в цепь электрод-инструмент — информационный провод. Для снижения индуктивности шунт сложен «пополам» с диэлектрической прокладкой внутри.

После получения осциллограмм тока I и напряжения U можно вычислить энергию импульса

$$W_{и} = \int_0^{\tau_{и}} UI dt,$$

где $\tau_{и}$ — длительность импульса.

Осциллограммы, полученные на осциллографе TDS 2012C, трудно представить в виде аналитических зависимостей с возможностью интегрирования. В связи с этим энергию импульса определяли графическим методом (рис. 3), суть которого сводится к разделению поля длительности осциллограмм на несколько равных интервалов. Для каждого i -го участка

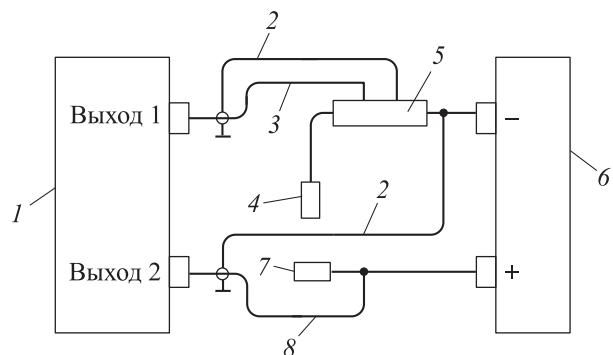


Рис. 2. Схема подключения осциллографа к оборудованию:

- 1 — осциллограф; 2 — общий провод; 3 и 8 — первый и второй информационные провода;
- 4 — электрод-инструмент; 5 — специальный шунт;
- 6 — электроэрозионный генератор; 7 — деталь

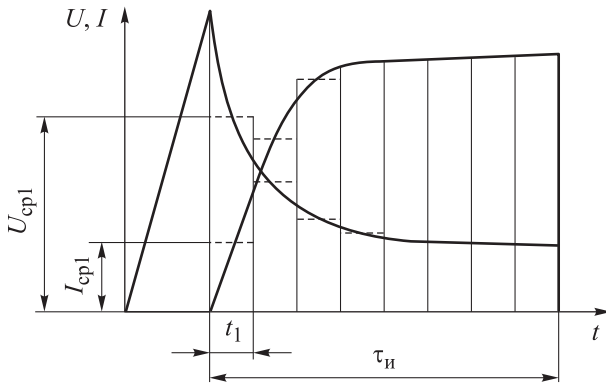


Рис. 3. Графическое определение энергии импульса

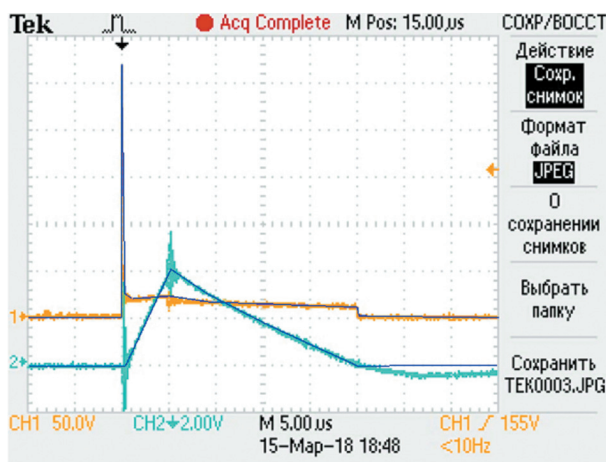


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения

графически находят средние значения тока $I_{ср i}$ и напряжения $U_{ср i}$, а затем энергию путем перемножения $I_{ср i}$, среднего напряжения $U_{ср i}$ и времени t_i . На рис. 3 обозначены эти параметры для первого участка.

Энергия импульса, равная сумме энергий участков, описывается выражением

$$W_{и} = \sum_{i=1}^n I_{ср i} U_{ср i} t_i = \left(\sum_{i=1}^n I_{ср i} U_{ср i} \right) t_i.$$

По этим осциллограммам (см. рис. 3) определяли энергию импульса путем их графическо-

го интегрирования в CAD-системе Компас-3D [9, 10] (рис. 4).

Полированные образцы (с параметром шероховатости $Ra = 0,08$ мкм), выполненные из сплавов ХН58МБЮД, ЖС32, ЖС6У и ХН52КВМТЮБ, помещали в рабочую зону станка (см. рис. 1). Заточенный латунный электрод-инструмент с помощью набора калиброванных шупов подводи́ли на зазор 6...8 мкм к образцу. Далее при одинаковых значениях напряжения холостого хода, межэлектродном зазоре и длительности импульса $\tau_{и} = 2, 5, 10, 15, 20$ мкс получали по пять эрозионных лунок (рис. 5).

Полученные лунки измеряли на микроскопе Olympus VX 51 с использованием его программных функций. Глубину лунки принимали как разность координат положений объектива микроскопа при фокусировке на поверхности образца и доньшке лунки. Точность такого метода измерения глубины лунки составляет $\pm 0,5$ мкм, погрешность оценки объема лунки — ± 8 %.

После получения на поверхности полированного образца эрозионных лунок их обмеряли и рассчитывали объем удаленного из них металла.

Чтобы оценить погрешность расчета объема по моделям шарового сегмента и половины эллипсоида (рис. 6), для всех значений длительности импульса (на основе фотографий лунок) строили их сечения по двум перпендикулярным осям. Объем лунки определяли по формуле

$$V_{л} = \frac{2\pi r_1 r_2 h}{3}.$$

Зная объем лунки $V_{л}$ и энергию импульса $W_{и}$, вычисляли коэффициент эрозии

$$k_{м} = \frac{V_{л}}{W_{и}}.$$

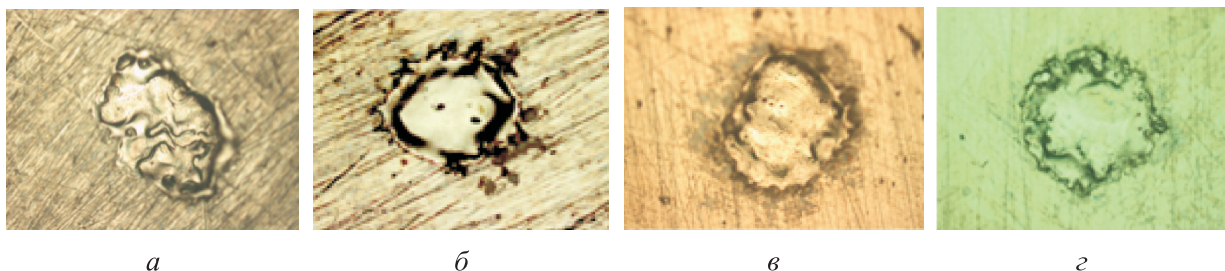


Рис. 5. Примеры лунок, полученных на исследуемых материалах: а — ХН58МБЮД; б — ЖС32; в — ЖС6У; г — ХН52КВМТЮБ

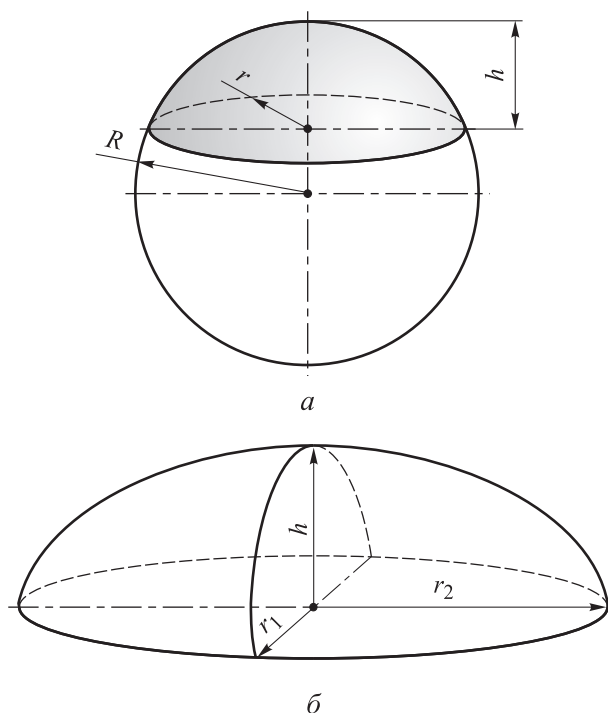


Рис. 6. Схемы моделей шарового сегмента (а) и половины эллипсоида (б):
 R — радиус сферы; r — радиус шарового сегмента

Для исследуемой группы сплавов получены следующие средние значения коэффициента эрозии $k_m \cdot 10^{-3}$, мм³/Дж:

ХН58МБЮД.....	4,79
ЖС32.....	5,43
ЖС6У.....	5,92
ХН52КВМТЮБ.....	4,78

Литература

- [1] Саушкин Б.П., Елисеев Ю.С. *Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
- [2] Саушкин Б.П., ред. *Электрохимическая обработка изделий авиационно-космической техники*. Москва, Форум, 2013. 480 с.
- [3] Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Унифицированные технологии изготовления штампов с применением электрофизических методов обработки. *Металлообработка*, 2010, № 2(56), с. 42–45.
- [4] Моргунов Ю.А., Саушкин Г.Б. Электрохимическое нанесение информации на поверхность деталей машин. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2009, № 12, с. 45–50.
- [5] Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П., Шандров Б.В. Развитие понятийного аппарата технологии машиностроения. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2016, № 4(229), с. 3–7, doi: 10.14489/hb.2016.04.pp.003-007
- [6] Поздеев И.А., Фомичев О.А., Саушкин Б.П. Уточнение коэффициентов эрозии жаропрочных сплавов. *XXX Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов*, Москва, 20–23 ноября 2018, Москва, Изд-во ИМАШ РАН, 2019, с. 648–650.
- [7] Ставицкий Б.И. *Из истории развития электроискровой обработки материалов*. Харьков, ЧФ «ЦентрИнформ», 2013. 104 с.
- [8] Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. *Физические основы электроэрозионной обработки*. Москва, Машиностроение, 1977. 43 с.

Анализ результатов исследования показал, что значения коэффициентов эрозии исследуемых материалов достаточно близки, так как основой сплавов является никель, массовое процентное содержание которого изменяется незначительно. В справочных данных указано, что значения коэффициентов эрозии для большой группы материалов лежат в пределах $(2...9) \cdot 10^{-3}$ мм³/Дж [11–15].

Таким образом, полученные значения коэффициента эрозии для группы исследованных материалов лежат в середине указанного диапазона. Погрешности измерения объема лунки V_L и энергии импульса $W_{и}$ не превышают 10 % их номинальных значений.

Выводы

1. Для группы исследованных материалов определены средние значения коэффициентов эрозии, лежащие в диапазоне $(4,7...5,9) \cdot 10^{-3}$ мм³/Дж.
2. Полученные данные могут быть использованы при назначении параметров режима в процессе проектирования различных операций ЭЭО.
3. Следует учитывать влияние параметров режима на коэффициент эрозии и применять полученные значения при режимах, близких к использованным в эксперименте, т. е. при проектировании операций прошивки отверстий малого диаметра.

- [9] Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. *Наукоёмкие технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии*. Москва, Форум, 2013. 928 с.
- [10] Груздев А.А. *Повышение производительности операций электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра путем наложения ультразвукового поля*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 207 с.
- [11] Шандров Б.В., ред. *Физико-химические методы и технологии обработки*. Москва, Московский Политех, 2018. 102 с.
- [12] Забельян Д.М., Рогов В.В., Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Скоростная электроэрозионная обработка пазов системы охлаждения жаровой трубы камеры сгорания. *Металлообработка*, 2012, № 3(69), с. 14–19.
- [13] Золотых Б.Н. *Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1968. 581 с.
- [14] Ставицкий И.Б. *Разработка методов повышения производительности электроэрозионной прошивки прецизионных глубоких отверстий*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1994. 256 с.
- [15] Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*, 2017, № 9(75), с. 17–20, doi: 10.12737/article_59ae90c63c66d6.60177261

References

- [1] Saushkin B.P., Eliseyev Yu.S. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electroerosive processing of aerospace equipment]. Moscow, Bauman Press, 2010. 437 p.
- [2] *Elektrokhimicheskaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electrochemical processing of aerospace equipment]. Ed. Saushkin B.P. Moscow, Forum publ., 2013. 480 p.
- [3] Mitryushin E.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Unified stamp manufacturing techniques using electrophysical processing methods. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 2(56), pp. 42–45 (in Russ.).
- [4] Morgunov Yu.A., Saushkin G.B. Electrochemical marking of the parts from aircraft materials. *Strengthening technologies and coatings*, 2009, no. 12, pp. 45–50 (in Russ.).
- [5] Morgunov Yu.A., Saushkin B.P., Shandrov B.V. Development of the conceptual background of machine-building technology. *Handbook. An Engineering journal with appendix*, 2016, no. 4(229), pp. 3–7 (in Russ.), doi: 10.14489/hb.2016.04.pp.003-007
- [6] Pozdeyev I.A., Fomichev O.A., Saushkin B.P. Utochneniye koeffitsiyentov erozii zharo-prochnykh splavov Refinement of the erosion coefficients of heat-resistant alloys. *XXX Mezhdunar. innovatsionnaya konf. molodykh uchenykh i studentov* [XXX International Innovation Conference of Young Scientists and Students]. Moscow, 2019, pp. 648–650.
- [7] Stavitskiy B.I. *Iz istorii razvitiya elektroiskrovoy obrabotki materialov* [From the history of the development of electrosark processing of materials]. Khar'kov, CHF «Tsentrinform» publ., 2013. 104 p.
- [8] Zolotykh B.N., Mel'der R.R. *Fizicheskiye osnovy elektroerozionnoy obrabotki* [Physical fundamentals of EDM]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1977. 43 p.
- [9] Morgunov Yu.A., Panov D.V., Saushkin B.P., Saushkin S.B. *Naukoyemkiye tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva. Fiziko-khimicheskiye metody i tekhnologii* [High technology engineering production. Physicochemical Methods and Technologies]. Moscow, Forum publ., 2013. 928 p.
- [10] Gruzdev A.A. *Povysheniye proizvoditel'nosti operatsiy elektroerozionnoy proshivki otverstiy malogo diametra putem nalozheniya ul'trazvukovogo polya*. Kand. Diss. [Improving the productivity of operations of electroerosive firmware of small-diameter holes by applying an ultrasonic field. Cand. Diss.]. Moscow, 2018. 207 p.
- [11] *Fiziko-khimicheskiye metody i tekhnologii obrabotki* [Physico-chemical methods and processing technologies]. Ed. Shandrov B.V. Moscow, Moskovskiy Politekh publ., 2018. 102 p.
- [12] Zabel'yan D.M., Rogov V.V., Mitryushin E.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. High-speed electrical discharge machining of grooves in the combustion tube cooling system of the combustion chamber. *Metalloobrabotka*, 2012, no. 3(69), pp. 14–19 (in Russ.).

- [13] Zolotykh B.N. *Osnovnyye voprosy teorii elektricheskoy erozii v impul'snom razryade v zhidkoy dielektricheskoy srede*. Dokt. Diss. [The main questions of the theory of electrical erosion in a pulsed discharge in a liquid dielectric medium. Doct. Diss.]. Moscow, 1968. 581 p.
- [14] Stavitskiy I.B. *Razrabotka metodov povysheniya proizvoditel'nosti elek-troerozionnoy proshivki pretsizionnykh glubokikh otverstiy*. Kand. Diss. [Development of methods for improving the performance of electroerosive piercing of precision deep holes. Cand. Diss.]. Moscow, 1994. 256 p.
- [15] Gruzdev A.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Peculiarities of electro-erosion machining with discharge low-energy pulses. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017, no. 9(75), pp. 17–20, doi: 10.12737/article_59ae90c63c66d6.60177261

Статья поступила в редакцию 13.03.2020

Информация об авторах

КУШНАРЕНКО Сергей Владимирович — ведущий инженер-технолог. АО НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко (141400, Химки, Российская Федерация, ул. Бурденко, д. 1, e-mail: kushnarenko@list.ru).

АСТАХОВ Юрий Павлович — кандидат технических наук, доцент, заслуженный машиностроитель РФ, главный советник отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: Y.Astahov@tmnpo.ru).

ФОМИЧЕВ Алексей Олегович — аспирант кафедры «Технология машиностроения». Московский Политехнический университет; инженер-технолог третьей категории отделения передовых производственных технологий. ФГУП «НПО Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й проезд Марьиной Рощи, д. 40, e-mail: darkdragon6666@mail.ru).

Information about the authors

KUSHNARENKO Sergei Vladimirovich — Manufacturing Process Engineer of the 1st Category. AO NPO Energomash named after Academician V. Glushko (141400, Khimki, Russian Federation, Burdenko St., Bldg. 1, e-mail: kushnarenko@list.ru).

ASTAKHOV Yuri Pavlovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Honoured Machine Builder of the Russian Federation, Chief Consultant, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: Y.Astahov@tmnpo.ru).

FOMICHEV Aleksei Olegovich — Postgraduate, Department of Technology of Mechanical Engineering. Moscow Polytechnic University; Manufacturing Process Engineer of the 3rd Category, Department of Advanced Manufacturing Technologies. Federal State Unitary Enterprise NPO Technomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Proezd Maryinoi Roshchi, Bldg. 40, e-mail: darkdragon6666@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кушнаренко С.В., Астахов Ю.П., Фомичев А.О. Исследование электроэрозионной обрабатываемости жаропрочных сплавов применительно к технологии прошивки отверстий малого диаметра. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 9, с. 69–75, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-69-75

Please cite this article in English as:

Kushnarenko S.B., Astakhov Y.P., Fomichev A.O. A Study of Electroerosive Machinability of Heat-Resistant Alloys in Relation to the Technology of Piercing Small Diameter Holes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 9, pp. 69–75, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-69-75