

УДК 621.9.048

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-204-210

Для цитирования: Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии электроконтактной обработки металлов вибрирующим электродом-инструментом в электролите // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 204–210. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-204-210.

For citation: Shestakov I. Y., Shestakov V. I., Remizov I. A. [Erosion coefficient of electrocontact processing of metals by a vibrating electrode-tool in electrolyte]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 204–210. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-204-210.

Коэффициент эрозии электроконтактной обработки металлов вибрирующим электродом-инструментом в электролите

И. Я. Шестаков^{1*}, В. И. Шестаков¹, И. А. Ремизов²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

*E-mail: yakovlevish@mail.ru

Технологические показатели электроконтактной обработки металлов вибрирующим электродом-инструментом в электролите исследованы достаточно полно. Знание коэффициента эрозии этого метода обработки позволит оценить производительность электроконтактной обработки заранее, на этапе технологической подготовки производства.

В статье представлена методика проведения эксперимента, описана установка на основе линейного электродинамического двигателя, которая позволяет создать вибрацию электрода-инструмента и проток электролита в межэлектродном зазоре. Показаны результаты экспериментальных исследований в виде графика зависимости коэффициента эрозии металла от скорости воды в межэлектродном зазоре при различных плотностях тока. На основании результатов и ранее проведённых исследований сделано предположение, что коэффициент эрозии зависит прямо пропорционально от напряжения в межэлектродном зазоре и обратно пропорционально от объёмной теплоёмкости металла и его температуры плавления. На основании теории электрических контактов и с учётом особенностей электроконтактной обработки в электролите уточнено определение напряжения в зоне контакта. Теоретическое значение коэффициента эрозии превышает экспериментальное значение в два и более раз.

Ключевые слова: коэффициент эрозии, электроконтактная обработка, вибрирующий электрод-инструмент, электролит, плотность тока, напряжение плавления.

Erosion coefficient of electrocontact processing of metals by a vibrating electrode-tool in electrolyte

I. Y. Shestakov^{1*}, V. I. Shestakov¹, I. A. Remizov²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabockii prospect, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V. F. Voyno-Yasensky
1, Partizan Zheleznyaka St., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

E-mail: yakovlevish@mail.ru

Technological indicators of electrocontact processing of metals with a vibrating electrode-tool in an electrolyte have been studied quite fully. Knowledge of the erosion coefficient of this processing method will allow us to evaluate the performance of electrocontact processing in advance, at the stage of technological preparation of production.

The article presents the methodology of the experiment, describes the installation based on a linear electrodynamic motor, which allows you to create a vibration of the electrode-tool and electrolyte flow in the interelectrode gap. The results of experimental studies are shown in the form of a graph of the dependence of the metal erosion coefficient on the water velocity in the interelectrode gap at various current densities. Based on the results and previous studies, it was assumed that the erosion coefficient depends in direct proportion to the voltage in the interelectrode gap and inversely proportional to the volumetric heat capacity of the metal and its melting temperature. Based on the theory of electrical contacts and taking into account the features of electrocontact processing in the electrolyte, the definition of voltage in the contact zone has been refined. The theoretical value of the erosion coefficient exceeds the experimental value by two or more times.

Keywords: erosion coefficient, electrocontact processing, vibrating electrode-tool, electrolyte, current density, melting voltage.

Введение

В производстве деталей летательных аппаратов используются копировально-прошивочные операции, осуществляемые электрофизическими и электрохимическими методами обработки металлов [1–4].

Эти операции могут осуществляться электро-контактной обработкой вибрирующим электродом-инструментом как на воздухе, так и в электролите [5–8].

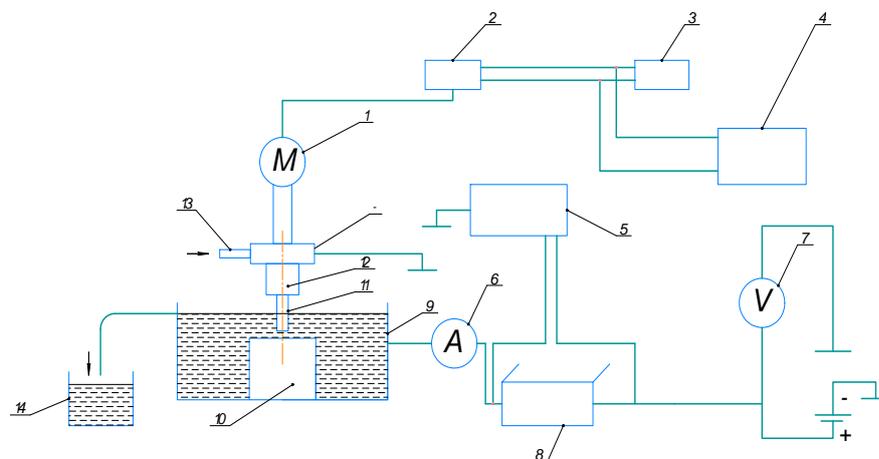


Рис. 1. Установка на основе линейного электродинамического двигателя:
 1 – линейный электродинамический двигатель; 2, 3 – генераторы импульсов; 4 – блок питания электродинамического двигателя; 5 – осциллограф; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – шунт; 9 – ванна; 10 – заготовка; 11 – электрод-инструмент; 12 – приспособление; 13 – штуцер входной; 14 – ёмкость мерная

Fig. 1. Installation based on a linear electrodynamic motor:
 1 – linear electrodynamic motor; 2, 3 – pulse generators; 4 – power supply for an electrodynamic motor; 5 – oscilloscope; 6 – ammeter; 7 – voltmeter; 8 – shunt; 9 – bath; 10 – workpiece; 11 – electrode-tool; 12 – device; 13 – inlet fitting; 14 – dimensional capacity

В вышеуказанных работах исследованы технологические показатели метода (производительность, износостойкость электрода-инструмента, шероховатость обрабатываемой поверхности, точность копирования). Однако при электроконтактной обработке важным параметром является коэффициент эрозии, позволяющий рассчитать производительность способа на этапе технологической подготовки производства. Коэффициент эрозии при электроконтактной обра-

ботке вращающимся электродом-инструментом рассмотрен в работе [9], однако исследования коэффициента эрозии электро-обработки вибрирующим катодом-инструментом отсутствуют.

Для опытов использовалась установка для электро-обработки на базе электродинамического привода [10], которая была усовершенствована с целью обеспечения проточного режима электролита через электрод-инструмент (см. рис. 1).

В качестве электролита была выбрана вода, являющаяся слабым электролитом [11; 12]. Вода обладает следующими преимуществами: малая стоимость, доступность, невоспламеняемость, возможность повышения культуры производства. Электроэрозионная обработка в воде при одинаковой энергии импульса сопровождается уменьшением износа электрода-инструмента, улучшением качества поверхности [13].

Методика исследований

В качестве электрода-инструмента используется медная трубка, наружный диаметр которой равен 7,9 мм, внутренний – 5,8 мм. Заготовка (10) из стали ХВГ устанавливается в ванну (9). Электрод-инструмент (11) фиксируется в приспособлении (12) с зазором 2–3 мм от заготовки. В ванну заливается вода на 15–20 мм выше уровня заготовки. Через штуцер (13) подаётся вода в электрод-инструмент (11) и включается электродинамический привод (1). Затем подаётся постоянное напряжение на электрод-инструмент и заготовку. В процессе опыта фиксируются средние значения тока и напряжения, объём электролита, прошедшего через межэлектродный зазор с помощью мерной ёмкости (14), время обработки. После обработки измеряются размеры круглого паза – глубина и диаметр.

Плотность тока рассчитывается по известному выражению

$$i = \frac{I_{\text{ср}}}{S},$$

где $I_{\text{ср}}$ – среднее значение тока, А; S – площадь поперечного сечения электрода, м².

Расход РЖ, протекающей через электрод-инструмент за время обработки, определяется

$$Q = p = \frac{V}{\tau},$$

где V – объём воды, протекающей за время обработки, м³; τ – время обработки, с.

Площадь, ограниченная внутренним диаметром электрода-инструмента (ЭИ) и величиной межэлектродного зазора (МЭЗа), рассчитывается следующим образом:

$$S_6 = l \cdot \delta,$$

где l – длина окружности, м; δ – действующее значение межэлектродного зазора по аналогии с переменным электрическим синусоидальным напряжением, м,

$$\delta = 0,707 \cdot 2 \cdot A,$$

где A – амплитуда колебаний ЭИ.

Средняя скорость движения электролита в МЭЗе:

$$v = Q / S_6.$$

Коэффициент эрозии рассчитывается по формуле

$$K_{\text{эр}} = V_{\text{ме}} / I_{\text{ср}} \cdot \tau,$$

где $V_{\text{ме}}$ – объём снятого металла.

Результаты исследований

По результатам расчётов построен график зависимости коэффициента эрозии от скорости воды в межэлектродном зазоре (рис. 2) при различных плотностях тока.

Из рис. 2 следует, что увеличение скорости движения воды в межэлектродном зазоре приводит к росту коэффициента эрозии. Это можно объяснить улучшением выноса продуктов эрозии из зоны обработки, так как конвективный массоперенос прямо пропорционален скорости потока воды.

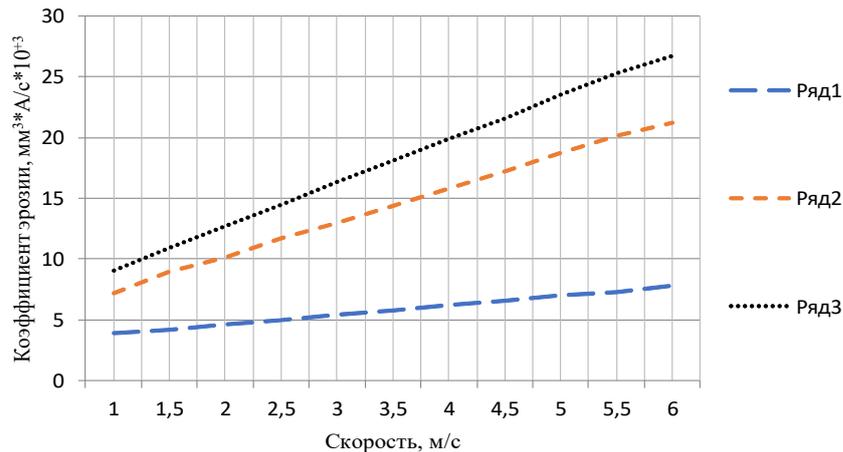


Рис. 2. Зависимость коэффициента эрозии металла от скорости воды в межэлектродном зазоре при различных плотностях тока: ряд 1 – 44 А/см²; ряд 2 – 91 А/см²; ряд 3 – 97 А/см²

Fig. 2. Dependence of the metal erosion coefficient on the water velocity in the interelectrode gap at different current densities: row 1 – 44 А/см², row 2 – 91 А/см², row 3 – 97 А/см²

Из графика видно, что коэффициент эрозии металла при электроконтактной обработке вибрирующим электродом-инструментом зависит от плотности тока. В свою очередь плотность тока прямо пропорциональна напряжённости электрического поля

$$i = \sigma * E, \tag{1}$$

где σ – удельная электропроводность электролита. Напряжённость электрического поля определяется выражением

$$E = U / \delta, \tag{2}$$

где U – напряжение на электродах.

Из выражений (1), (2) следует, что коэффициент эрозии электроконтактной обработки металлов вибрирующим электродом-инструментом зависит прямо пропорционально от напряжения на электродах. Напряжение на электродах складывается из падений напряжений в прикатодной и прианодной областях и слое электролита [14].

В работе [9] сделан вывод, что коэффициент эрозии зависит от удельной объёмной теплоёмкости обрабатываемого металла. Следовательно, указанная зависимость обратно пропорциональная. Такая же зависимость коэффициента эрозии наблюдается и от температуры плавления обрабатываемого металла. С учётом вышеизложенного можно представить зависимость теоретического коэффициента эрозии от теплофизических свойств обрабатываемого металла и падения напряжения на контакте выражением

$$K_T = U_{\text{п}} / C_v * T, \tag{3}$$

где K_T – теоретический коэффициент эрозии обрабатываемого металла, м³/А*с; $U_{\text{п}}$ – падение напряжения на контакте в прианодной области, В; C_v – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого металла, Дж/м³К; T – температура плавления обрабатываемого металла, К.

Падение напряжения на контакте, при котором температура в месте контактирования достигает температуры плавления металла, называется напряжением плавления [15]. Следует заметить, что, по мнению автора [16], температура плавления при контакте металлов является наивысшей, которая допустима в твёрдом контакте, и увеличение напряжения приводит лишь к сплавлению контактов. В нашем случае сплавление электродов не происходит из-за кратковременности контактирования.

Продукты эрозии, полученные в результате электроконтактной обработки, имеют преимущественно шарообразную форму и окислённую поверхность, что свидетельствует о расплавлении обрабатываемого металла [7].

Известно, что теплоёмкость металлов и сплавов с увеличением температуры увеличивается. Теплоёмкость магнитных сталей вблизи ферромагнитного фазового перехода возрастает на 40 %

по сравнению с теплоёмкостью при комнатной температуре [17]. Обрабатываемая заготовка из стали ХВГ содержит не более 3 % легирующих компонентов, поэтому теплоёмкость материала будет определяться железом. В справочнике [18] приведены формула и коэффициенты для расчёта удельной мольной теплоёмкости железа в интервале температур от 273 до 2142 К. Используя известные соотношения, была рассчитана удельная объёмная теплоёмкость железа в указанном интервале температур. Результаты расчётов приведены на рис. 3.

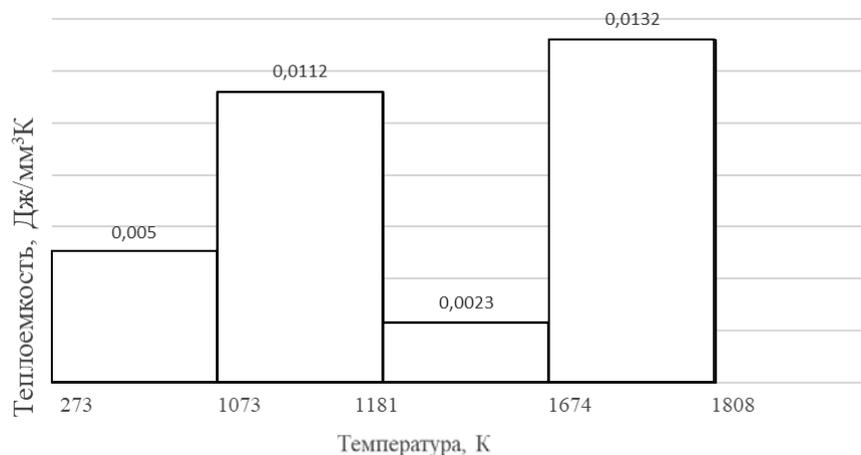


Рис. 3. Зависимость теплоемкости железа от температуры

Fig. 3. The dependence of the heat capacity of iron on temperature

Умножая теплоёмкость на интервал температур и суммируя результаты, найдём общую площадь. Разделив эту площадь на весь интервал температур 1535 К, получим среднюю объёмную теплоёмкость равную 0,0054 Дж/мм³К.

Напряжение плавления железа дано в справочнике [19] $U = 0,6$ В, температура плавления железа [18] $T = 1811$ К. После подстановки данных в выражение (3) получим $K_T = 0,06$ м³/А*с. Из сравнения данных, приведенных на рис. 2, следует, что опытные значения коэффициента эрозии в 2–3 раза меньше теоретического значения. Увеличить данный коэффициент можно, увеличив плотность тока и скорость движения электролита в зазоре. Плотность тока определяется напряжением (формулы (1) и (2)). Однако увеличение напряжения ограничено переходом электроконтактной обработки в размерную обработку дугой. При размерной обработке дугой напряжение на электродах должно быть не менее 20–30 В [20; 21].

Заключение

Коэффициент эрозии, используемый для оценки стойкости контактов при электрической эрозии, может использоваться для оценки эффективности электроконтактной обработки вибрирующим электродом-инструментом в электролите. Экспериментальное значение коэффициента эрозии меньше теоретического, что свидетельствует о необходимости исследований для совершенствования рассматриваемого метода обработки.

Библиографические ссылки

1. Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении / В. А. Шманев, В. Г. Филимошин, А. Х. Каримов и др. М. : Машиностроение, 1986. 168 с.
2. Справочник по электрофизическим и электрохимическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др. / под общ. ред. В. А. Волосатого. Л. : Машиностроение, 1988. 719 с.
3. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство газотурбинных двигателей. М. : Машиностроение/ Машиностроение-Полет, 2002. 376 с.
4. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов / под ред. В. А. Моисеева и В. А. Тарасова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 381 с.

5. Шестаков И. Я., Рубанов С. В., Золотых Е. И. Исследование электроконтактной обработки при вибрации электрода-инструмента // *Материалы, технологии, конструкции*. Красноярск : САА, 1996. С. 28–32.
6. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Миленин В. Н. Электро-контактное прошивание заклёпок // *Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика*. 2003. Вып. 9. С. 81–84.
7. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Цуканов А. В. Импульсная электро-обработка вибрирующим электродом-инструментом // *Вестник СибГАУ*. 2004. № 5. С. 253–258.
8. Шестаков И. Я., Артюкова О. Е., Ремизов И. А. Особенности электро-контактно-химической обработки вибрирующим электродом-инструментом // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 1(47). С. 175–177.
9. Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии при электроконтактной обработке металлов // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022. Т. 23, № 2. С. 337–346.
10. Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Артюкова О. Е. Конструирование исследовательской установки для электрообработки на базе электродинамического привода // *Вестник СибГАУ*. 2010. № 4(30). С. 133–137.
11. Робинсон Р., Стокс Р. Растворы электролитов. М. : ИЛ, 1963. 436 с.
12. Салем Р. Р. Теоретическая электрохимия. М. : Вузовская книга, 2001. 328 с.
13. Ставицкий Б. И., Конулин С. В. К вопросу об оптимальной форме холостых импульсов напряжения и рабочих импульсов тока при прецизионной электроискровой обработке в воде // *Электронная обработка материалов*. 1979. № 3. С. 5–8.
14. Мороз И. И., Алексеев Г. А., Водяницкий О. А. и др. Электрохимическая обработка металлов. М. : Машиностроение, 1969. 208 с.
15. Новиков Ю. Н. Теория и расчёт электрических аппаратов. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 479 с.
16. Хольм Р. Электрические контакты. М. : Издательство иностранная литература. 1961. 464 с.
17. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. ; под ред. И.С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
18. Свойства элементов. В 2 ч. Ч. 1. Физические свойства : справочник / Т. В. Андреева, А. С. Болгар, М. В. Власова и др. ; под ред. Г. В. Самсонова. М. : Металлургия, 1976. 600 с.
19. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник / под ред. Ю. М. Пятина. М.: Машиностроение, 1982. 528 с.
20. Мещеряков Н. Г. Высокопроизводительная размерная обработка дугowymi разрядами. М. : Машиностроение, 1991. 40 с.
21. Носуленко В. И., Мещеряков Г. Н. Размерная обработка металлов // *Электронная обработка материалов*. 1981. № 1. С. 19–22.

References

1. Shmanev V. A., Filimoshin V. G., Karimov A. Kh. et al. *Tekhnologiya elektrohimicheskoy obrabotki detalej v avia-dvigatellestroenii* [Technology of electrochemical processing of parts in aircraft engine building]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 168 p.
2. Amitan G. L., Bajsupov I. A., Baron Y. M. *Spravochnik po elektrofizicheskim i elektrohimicheskim metodam obrabotki* [Reference book on electrophysical and electrochemical processing methods]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988, 719 p.
3. Krymov V. V., Eliseev Yu. S., Zudin K. I. *Proizvodstvo gazoturbinnnyh dvigateley* [Production of gas turbine engines.] Moscow, Mashinostroenie, Mashinostroenie-Flight Publ., 2002, 376 p.
4. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A., Filimonov A. S. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnyh raketnyh dvigateley* [Technology for the production of liquid rocket engines]. Moscow, MSTU im. N. E. Bauman Publ., 2008, 381 p.
5. Shestakov I. Ya., Rubanov S. V., Zolotykh E. I. [Research of electrocontact processing at vibration of an electrode-tool]. *Materials, technologies, designs*. Krasnoyarsk, 1996, P. 28–32 (In Russ.).

6. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Milenin V. N. [Electro-contact stitching of rivets]. *Perspective materials, technologies, designs, economics*. 2003, Is. 9, P. 81–84 (In Russ.).
7. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Tsukanov A. V. [Pulse electro-processing with a vibrating electrode-tool]. *Vestnik SibGAU*. 2004, No. 5, P. 253–258 (In Russ.).
8. Shestakov I. Ya., Artyukova O. E., Remizov I. A. [Features of electro-contact-chemical treatment with a vibrating electrode-tool]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 1 (47), P. 175–177 (In Russ.).
9. Shestakov I. Ya., Shestakov V. I., Remizov I. A. [Erosion coefficient in electrocontact processing of metals]. *Vestnik SAZH*. 2022, No. 2, P. 337–346 (In Russ.).
10. Fadeev A. A., Shestakov I. Ya., Artyukova O. E. [Designing a research facility for electrical processing based on an electrodynamic drive]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4 (30), P. 133–137 (In Russ.).
11. Robinson R., Stokes R. *Rastvory elektrolitov* [Electrolyte solutions]. Moscow, IL Publ., 1963, 436 p.
12. Salem R. R. *Teoreticheskaya elektrokhimiya* [Theoretical electrochemistry]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2001, 328 p.
13. Stavitsky B. I., Konulin S. V. [On the question of the optimal form of idle voltage pulses and working current pulses during precision electrospark machining in water]. *Electronic processing of materials*. 1979, No. 3, P. 5–8 (In Russ.).
14. Moroz I. I., Alekseev G. A., Vodyanitsky O. A. et al. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 208 p.
15. Novikov Yu. N. *Teoriya i raschyot elektricheskikh apparatov* [Theory and calculation of electrical apparatus]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986, 479 p.
16. Holm R. *Elektricheskie kontakty* [Electric contacts]. Moscow, Foreign Literature Publ., 1961, 464 p.
17. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovsky A. M. et al. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p.
18. Andreeva T. V., Bolgar A. S., Vlasova M. V. et al. *Svoystva elementov. V 2 chastyah. Ch. 1. Fizicheskie svoystva. Spravochnik* [Properties of elements. In 2 parts. Part 1. Physical properties. Handbook]. Moscow, Metallurgy Publ., 1976, 600 p.
19. *Materialy v priborostroenii i avtomatike. Spravochnik* [Materials in instrument making and automation. Handbook]. Ed. Yu. M. Pyatina. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 528 p.
20. Meshcheryakov N. G. *Vysokoproizvoditel'naya razmernaya obrabotka dugovymi razryadami* [High-performance dimensional processing by arc discharges]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 40 p.
21. Nosulenko V. I., Meshcheryakov G. N. [Dimensional processing of metals]. *Electronic processing of materials*. 1981, No. 1, P. 19–22 (In Russ.).

© Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А., 2023

Шестаков Иван Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Шестаков Владислав Иванович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Ремизов Игорь Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской и биологической физики; Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого. E-mail: rector@krsk.info.

Shestakov Ivan Yakovlevich – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Electronic Engineering and Telecommunications; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Shestakov Vladislav Ivanovich – post-graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Remizov Igor Anatolyevich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Medical and Biological Physics; Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V. F. Voyno-Yasenetsky. E-mail: rector@krsk.info.
