

ОБ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Проведена оценка применимости тепловой концепции электрической эрозии к сравнительным испытаниям электроконтактных материалов на электроэрозионную износостойкость в режиме импульсного разряда. Приведено сравнение величин удельной эрозии, полученных экспериментально и путем теоретического расчета. Отмечено, что для получения количественного соответствия экспериментальных и теоретических оценок необходимо применять полуэмпирический подход, при котором в теоретических расчетных зависимостях используются параметры, определяемые экспериментально. Проверена возможность применения критерия Палатника, совмещающего в себе комплекс теплофизических характеристик материала электродов, для сравнительной оценки и выбора материалов контакт-деталей.

Ключевые слова: электроэрозионная износостойкость, импульсный разряд, критерий Палатника, баланс энергии, удельная электрическая эрозия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-21-28

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая эрозия относится к одному из основных механизмов изнашивания электроконтактных соединений и выступает как негативный фактор, который снижает надежность и долговечность электрического оборудования. При электроэрозионной обработке деталей процесс электрической эрозии используется как технологический инструмент, в некоторых случаях безальтернативный (например, при обработке сверхтвердых и сверхпрочных материалов). Процессы электрической эрозии привлекали и продолжают привлекать внимание специалистов, как теоретиков, так и практиков.

Принято различать несколько видов электрической эрозии [1]. Один из них – эрозия под действием импульсных электрических разрядов. Под общим термином «импульсный» обычно понимается разряд малой длительности. В зависимости от конкретных условий он может принимать форму искрового или дугового разряда, переходя от одной формы к другой. Для искрового разряда характерны очень малая длительность ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ с) и достаточно большая разность потенциалов между электродами; с увеличением длительности искровой разряд переходит в дуговой [2].

Существует несколько теорий, объясняющих механизмы электроэрозионного изнашивания. Одной из признанных теорий электрической эрозии металлов является тепловая [1], согласно которой в результате воздействия концентрированного потока энергии материал электродов в приповерхностном слое плавится и частично испаряется. Расплавленный металл полностью или частично удаляется с электрода.

В импульсном разряде не вся энергия, подводимая к контакту, расходуется на эрозию материала электродов. Часть энергии переходит во внутреннюю энергию плазмы, образующейся в межконтактном зазоре, отводится в объем электродов за счет теплопроводности и т.д. [1].

Однако даже в рамках тепловой теории электроэрозионного изнашивания нет единства в подходах к интерпретации экспериментальных результатов и их теоретическому обоснованию. Цель данной работы – оценка применимости тепловой концепции электрической эрозии к сравнительным испытаниям электроконтактных материалов на электроэрозионную износостойкость в режиме импульсного разряда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электроэрозионному изнашиванию подвергались монолитные образцы из металлов (вольфрама, молибдена, серебра, меди), широко применяемых в электроконтактных соединениях, и композиты на медной основе. К последним относятся дисперсно-упрочненный композиционный материал [3] и порошковые композиты медь – хром с содержанием хрома 20...80 %; медь – карбид хрома (вольфрама) с содержанием карбида 2...10 %. Всего было исследовано двенадцать различных материалов.

Испытания материалов на электроэрозионное изнашивание проводили на установке, описанной в работе [4]. Плоский образец из исследуемого материала контактировал с вольфрамовым электродом – зондом диаметром 1 мм. Вольфрам выбран в качестве материала зонда из-за его высокой электроэрозионной стойкости. Источником энергии импульсного разряда служил емкостный накопитель. Максимальная энергия разряда $W_0 = 3,2$ Дж.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Критерий электроэрозионной стойкости. При выборе материала для контактных деталей электроконтактных устройств полезно опираться на количественные критерии, позволяющие провести оценку его электроэрозионной стойкости в сравнении с другими вариантами. Одним из них является известный критерий Л.С. Палатника [5], который можно записать в виде

$$\Pi = T_{\text{пл}} \sqrt{\lambda c_{\text{уд}} d}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала электрода; λ – теплопроводность; $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость; d – плотность. В таком виде критерий имеет размерность величины $q\sqrt{t}$, где q – плотность потока энергии; t – время.

Физический смысл критерия в том, что он позволяет оценить время, необходимое для нагревания материала до температуры плавления при данной плотности потока энергии:

$$t_{\text{пл}} = k \frac{\Pi^2}{q^2},$$

где k – безразмерный коэффициент.

Как отмечается в работе [5], критерий Палатника характеризует износостойкость материала в условиях искрового разряда. Очевидно, что чем больше величина критерия, тем выше эрозионная стойкость материала (меньше величина износа).

Баланс энергии в импульсном разряде. Исходя из тепловой концепции электрической эрозии, баланс энергии в импульсном разряде можно записать в виде

$$W_0\eta = W_1 + W_2, \quad (2)$$

где W_0 – энергия, запасенная в источнике; η – коэффициент, значение которого лежит в интервале $0 \dots 1$; W_1 – энергия, затраченная на нагревание и плавление материала электрода; W_2 – энергия, затраченная на нагревание и испарение части или всего расплавленного материала.

Расчетные зависимости для величин W_1 и W_2 в таком случае имеют вид:

$$W_1 = mc_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_0) + mL_{\text{пл}}; \quad (3)$$

$$W_2 = \alpha mc_{\text{ж}}(T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}}) + \alpha mL_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где m – масса удаленного с поверхности электрода материала; $c_{\text{тв}}$ и $c_{\text{ж}}$ – удельные теплоемкости материала электрода в твердом и жидком состоянии соответственно; $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{исп}}$ – температура плавления и испарения материала соответственно; T_0 – рабочая температура контакт-детали; $L_{\text{пл}}$ и $L_{\text{исп}}$ – удельная теплота плавления и испарения материала соответственно; α – доля испарившегося материала.

По результатам экспериментальных исследований различных авторов можно заключить, что для типичных электроконтактных материалов доля испарившегося материала составляет $1/3$ и более [6–8]. Для тугоплавких металлов $\alpha = 0,4 \dots 0,6$; для металлов со средней температурой плавления $\alpha = 0,2 \dots 0,4$; для легкоплавких металлов $\alpha = 0,1 \dots 0,2$ [5].

Количественные характеристики электроэрозионного изнашивания. Многочисленными исследованиями установлено, что масса удаленного материала в процессе электроэрозионного изнашивания пропорциональна числу циклов коммутации, энергии, подводимой к контакту, и количеству электричества (заряду), прошедшего через контакт за один цикл. В литературе приводятся различные величины удельного износа (удельной эрозии) [5, 9]. Перечислим их.

1. Объемная I_V и массовая I_m эрозия в расчете на один цикл, $\text{м}^3/\text{цикл}$ и $\text{кг}/\text{цикл}$ соответственно:

$$I_V = V/n_{\text{ц}}; \quad I_m = m/n_{\text{ц}},$$

где V и m – объем и масса материала, потерянные электродами в результате эрозии за количество циклов $n_{\text{ц}}$.

2. Объемная и массовая эрозия в расчете на единицу коммутируемой за один цикл энергии W , $\text{м}^3/\text{Дж}$ и $\text{кг}/\text{Дж}$ соответственно:

$$I_V = V/(n_{\text{ц}}W); \quad I_m = m/(n_{\text{ц}}W).$$

3. Объемная и массовая эрозия в расчете на единицу заряда Q , прошедшего через контакт, $\text{м}^3/\text{Кл}$ и $\text{кг}/\text{Кл}$ соответственно:

$$I_v = V/(n_{ц}Q); \quad I_m = m/(n_{ц}Q),$$

где $Q = \int_0^{t_{и}} i dt$; i – ток через контакт; $t_{и}$ – длительность импульса.

Для сравнительных (качественных) испытаний, когда эксперименты с различными материалами проводятся на одной установке в одинаковых условиях, можно использовать все три характеристики. Для количественных оценок, в том числе для проверки энергетического баланса, можно применять только вторую и третью характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость величины удельной эрозии от полярности электрода. Одно из существенных отличий искровой формы импульсного разряда от дуговой – соотношение величин удельной эрозии электродов разной полярности – катода и анода. Обычно при искровом разряде больше изнашивается анод, при дуговом – катод. Результаты наших экспериментов по исследованию зависимости электроэрозионного изнашивания от полярности электрода представлены на рис. 1.

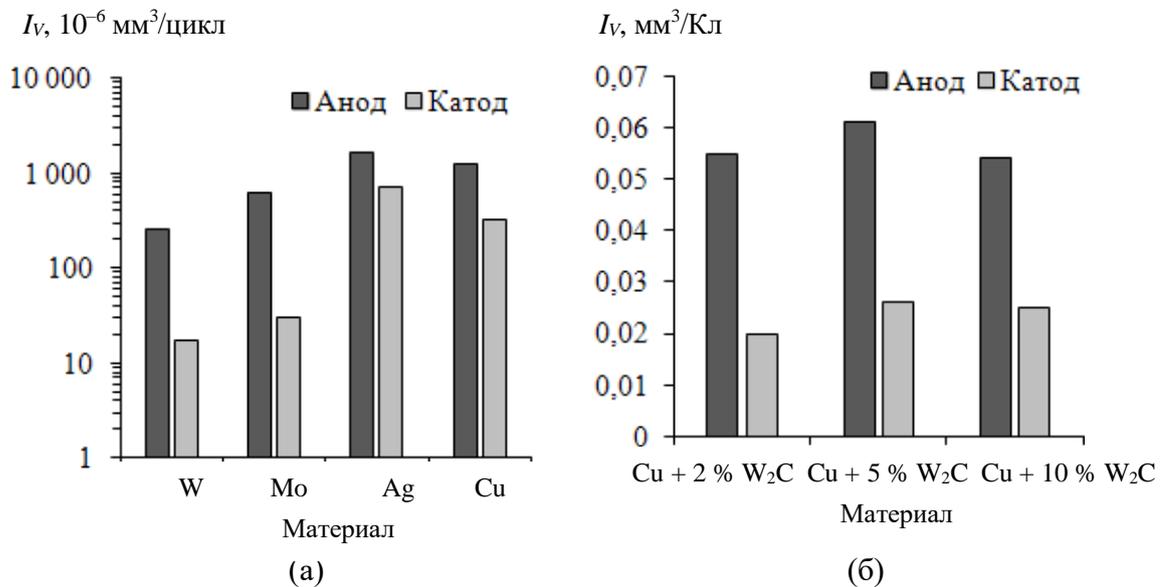


Рис. 1. Зависимость удельной эрозии материала электрода от его полярности: монокристаллические материалы (а); порошковые композиты (б)

Как видно из рис. 1, в условиях описываемых экспериментов материал анода изнашивается больше, чем материал катода. Этот вывод справедлив также для целой серии композиционных материалов различного состава, испытанных нами, но не показанных на рис. 1. На этом основании можно сделать вывод, что в данном случае импульсный разряд близок к искровому.

Величина удельной эрозии, помимо полярности, в значительной степени зависит от природы электроконтактного материала и может отличаться для различных материалов в десятки раз (рис. 1а). По этой причине на рис. 1а по оси ординат использована логарифмическая шкала. Более подробно влияние теплофизических параметров материала на величину удельной эрозии опишем далее с помощью критерия электроэрозионной стойкости Л.С. Палатника.

Критерий Палатника как характеристика электроэрозионной стойкости материала. Значения критерия, рассчитанные согласно уравнению (1) для некоторых типичных электроконтактных материалов, приведены в таблице.

Величины критерия Палатника для электроконтактных материалов [5]

Материал	Вольфрам	Молибден	Медь	Серебро
П, (Вт/м ²)с ^{1/2}	65,4	42,6	41,4	31,4

Результаты экспериментов, представленные на рис. 2, подтверждают ожидаемую зависимость, вытекающую из физического смысла критерия Палатника: чем больше значение критерия, тем меньше величина удельной эрозии (выше эрозионная износостойкость). Таким образом, в условиях искрового разряда еще раз подтверждена возможность использования критерия Палатника для качественного сравнения электроконтактных материалов с точки зрения их электроэрозионной износостойкости.

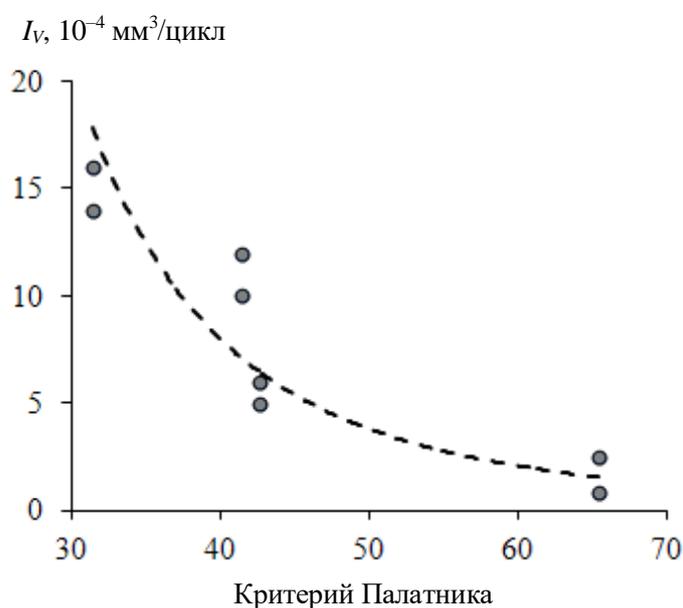


Рис. 2. Зависимость удельной эрозии материала анода от величины критерия Палатника: • – экспериментальные результаты; пунктир – линия тренда (различные значения удельной эрозии при одном значении критерия соответствуют различному взаимному расположению электродов)

Баланс энергии при электроэрозионном изнашивании. Анализируя энергетический баланс электроимпульсного разряда, логично характеризовать износостойкость материала отношением массы или объема материала, потерянного вследствие эрозии, к величине коммутируемой энергии. С учетом уравнений (3) и (4) получим формулы для теоретической оценки массовой и объемной эрозии:

$$I_{m \text{ теор}} = \frac{m}{W_1 + W_2} = \frac{1}{c_{\text{ТВ}}(T_{\text{пл}} - T_0) + L_{\text{пл}} + \alpha c_{\text{ж}}(T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}}) + \alpha L_{\text{исп}}} ; \quad (5)$$

$$I_{V \text{ теор}} = \frac{V}{W_1 + W_2} = \frac{I_m}{d}. \quad (6)$$

Рассчитанные по уравнениям (5) и (6) величины удельной эрозии больше соответствующих экспериментальных величин $I_{m \text{ эксп}} = m/W_0$ и $I_{V \text{ эксп}} = V/W_0$. Например, для меди $I_{V \text{ эксп}} = 1,2 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж, тогда как $I_{V \text{ теор}} = 4,9 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж; для молибдена $I_{V \text{ эксп}} = 0,5 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж и $I_{V \text{ теор}} = 2,1 \cdot 10^{-11}$ м³/Дж. Очевидная причина этого состоит в следующем: в формулах (5) и (6) предполагается, что вся энергия, запасенная в источнике, выделяется в виде тепла в приповерхностных слоях материала, в формуле (2) принимается $\eta = 1$. На самом деле значение коэффициента $\eta < 1$. Автор работы [1] приводит шесть возможных каналов расходования энергии источника, из которых отвод энергии в материал электродов с последующим его удалением далеко не единственный. Очевидно, что величина коэффициента η зависит от многих, порой случайных, трудно поддающихся теоретическому анализу факторов. В случае электроэрозионной обработки материалов величину η можно трактовать как коэффициент полезного действия процесса; для электроэрозионного изнашивания такая трактовка, разумеется, бессмысленна. В число факторов, влияющих на значение коэффициента η , входит величина межконтактного зазора, в котором происходит электрический разряд. По данным работы [9], для искрового разряда и медных электродов (в зависимости от величины зазора) коэффициент $\eta \approx 0,30 \dots 0,67$. Учитывая потери энергии (см. формулу (2)), можно получить разумное соответствие экспериментальных и теоретических величин удельной эрозии. На рис. 3 представлено сравнение расчетных значений удельной объемной эрозии с результатами наших экспериментов для двенадцати материалов. Несмотря на значительный разброс данных, наблюдается высокая степень корреляции экспериментальных и теоретических величин с коэффициентом корреляции $R = 0,83$.

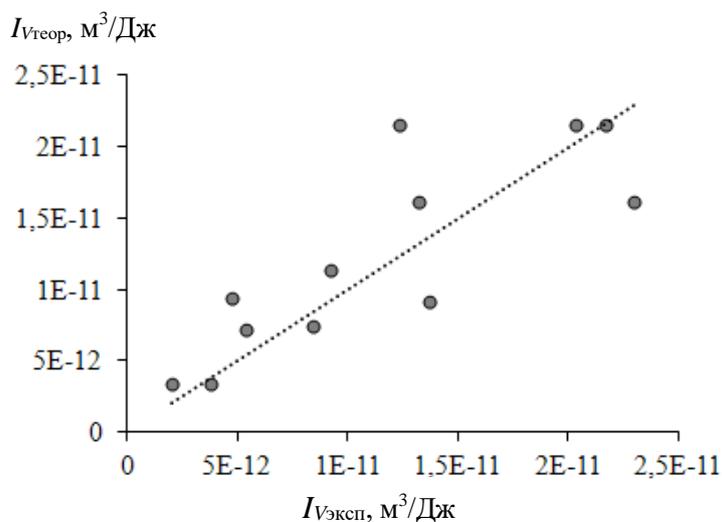


Рис. 3. Сравнение теоретических и экспериментальных значений объемной удельной эрозии при $\eta = 0,44$: точки – результаты экспериментов; пунктир – $I_{V \text{ теор}} = I_{V \text{ эксп}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов, проведенных на установке и по методике сравнительного испытания электроконтактных материалов на электроэрозионную износостойкость, показали качественное соответствие основным положениям признанной тепловой концепции электрической эрозии металлов. Тем самым подтверждена возможность применения данной методики для сравнительных испытаний материалов на электроэрозионную износостойкость в режиме импульсного разряда. Для получения количественного соответствия экспериментальных и теоретических оценок необходимо учитывать энергетический баланс электроимпульсного разряда, в частности долю подводимой к контакту энергии, которая расходуется непосредственно на удаление

материала. Это сложно сделать чисто теоретически ввиду многочисленности и случайного характера факторов, влияющих на энергетический баланс разряда. Остается полуэмпирический подход, при котором в теоретических расчетных зависимостях используются параметры, определяемые экспериментально. Чем больше экспериментальная база таких параметров, тем достовернее будут результаты расчетов.

Эксперименты подтвердили, что для сравнительной оценки и выбора материалов контакт-деталей с точки зрения их электроэрозионной износостойкости может успешно применяться критерий Палатника, совмещающий в себе комплекс теплофизических характеристик материала электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.
2. Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., Полянчикова М.Ю., Тибиркова М.А., Сидякин Ю.И., Кожевникова А.А. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении: учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 240 с.
3. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005. 408 с.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Левыкин Д.А. Исследование эрозионной износостойкости электроконтактных материалов в режиме импульсного разряда // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр.* Тверь: ТГТУ, 2005. С. 112–116.
5. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
6. Плоскин В.В. Структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при электроэрозионной обработке: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 281 с.
7. Химухин С.Н., Хосен Ри, Ри Э.Х. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии: монография. Хабаровск: ТОГУ, 2015. 127 с.
8. Пугачевский М.А. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях Cu, Ni, Mo под действием однократных электрических разрядов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Хабаровск, 2006. 135 с.
9. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов. Харьков: ЦентрИнформ, 2013. 104 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Об электроэрозионном изнашивании и энергетическом балансе в режиме электроимпульсного разряда // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 2 (10). С. 21–28.

ON ELECTRIC EROSION WEAR AND ENERGY BALANCE IN ELECTRIC PULSE DISCHARGE MODE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

An assessment of the applicability of the thermal concept of electrical erosion to comparative tests of electrical contact materials for electrical discharge wear resistance in a pulsed discharge mode is carried out. A comparison of the values of specific

erosion obtained experimentally and by theoretical calculation is presented. It is noted that to obtain a quantitative agreement between the experimental and theoretical estimates, it is necessary to use a semi-empirical approach, in which the parameters determined experimentally are used in the theoretical calculated dependences. The results of testing monolithic and composite specimens for electroerosive wear resistance confirmed that the Palatnik criterion, which combines a set of thermophysical characteristics of the electrode material, can be used for comparative assessment and selection of materials for contact parts.

Keywords: electroerosive wear resistance, pulse discharge, Palatnik criterion, energy balance, specific electrical erosion.

REFERENCES

1. Namitokov K.K. Elektroerozionnye yavleniya [Electrical discharge phenomena]. Moscow: Energiya, 1978. 456 p.
2. Polyanchikov Yu.N., Skhirtladze A.G., Vorontsova A.N., Polyanchikova M.Yu., Tibirkova M.A., Sidyakin Yu.I., Kozhevnikova A.A. Elektrokhimicheskiye i elektrofizicheskiye metody obrabotki v sovremennom mashinostroyenii: ucheb. posobiye [Electrochemical and electrophysical processing methods in modern mechanical engineering: textbook]. Volgograd: VolgGTU, 2015. 240 p.
3. Berent V.Ya. Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta [Materials and properties of electrical contacts in railway transport devices]. Moscow: Intekst, 2005. 408 p.
4. Izmailov V.V., Novoselova M.V., Levykin D.A. Investigation of erosion wear resistance of electrical contact materials in a pulsed discharge mode. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel i detaley mashin: mezhvuz. sb. nauch. tr.* Tver: TSTU, 2005. pp. 112–116. (In Russian).
5. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.
6. Ploshkin V.V. Structural and phase transformations in the surface layers of steels during electrical discharge machining: Dr. dis. (technical). Moscow, 2006. 281 p. (In Russian).
7. Khimukhin S.N., Hosen Ri, E.H. Ri Struktura i svoystva metallov i splavov pri elektroiskrovom vozdeystvii: monografiya [Structure and properties of metals and alloys with electrospark action: monograph]. Khabarovsk: TOGU, 2015. 127 p.
8. Pugachevsky M.A. Structural-phase transformations in the surface layers of Cu, Ni, Mo under the action of single electric discharges: Cand. dis. (phys.-math.). Khabarovsk, 2006. 135 p. (In Russian).
9. Stavitsky B.I. Iz istorii elektroiskrovoy obrabotki materialov [From the history of electrospark processing of materials]. Kharkov: CenterInform, 2013. 104 p.

Поступила в редакцию/received: 25.02.2021; после рецензирования/revised: 03.03.2021;
принята/accepted: 15.03.2021