

УДК 669.1.08.29:621.785

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ИСКРОВОЙ ЭРОЗИИ*

*Романов Д.А., к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин
им. профессора В.М. Финкеля (romanov_da@physics.sibsiu.ru)
Протопопов Е.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии
черных металлов (protopopov@sibsiu.ru)*

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Предложена модель электроэрозионного разрушения композиционных электровзрывных покрытий систем W–Cu, Mo–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu, Ti–B–Cu и TiB₂–Cu в условиях искровой эрозии, происходящей при размыкании электрических контактов. Модель рассматривает испарение электродов под действием теплового потока, который возникает вследствие искрообразования при размыкании электрических контактов. При построении этой модели сопротивление электрических контактов во время испытаний находилось в интервале 40 – 50 мкОм. Модель строится в рамках задачи нагрева полупространства поверхностным нормальным импульсным источником тепла, равномерно распределенным по площади определенного радиуса и с определенной длительностью воздействия. Распределение энергии импульса во времени аппроксимировали прямоугольным импульсом. Решали уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат для плоского мгновенного источника тепла с учетом конечного времени импульса. По температуре поверхности определяли давление паров металла. В расчетах принимали напряжение на контактах 380 В, силу тока 3 А, время искрового разряда 150 мкс, радиус пятна контакта искрового разряда с поверхностью 152 мкм. В результате расчета определены температура поверхности электродов из чистого материала, температура поверхности электродов из композиционных покрытий, глубина слоя испарения электродов из чистых материалов, потеря массы композиционного покрытия после единичного импульса разряда, относительное изменение объемной электроэрозионной стойкости электродов из чистых материалов, относительное изменение массовой электроэрозионной стойкости электродов из чистых материалов, относительное изменение объемной электроэрозионной стойкости электровзрывных композиционных покрытий, относительное изменение массовой электроэрозионной стойкости электровзрывных композиционных покрытий. Произведен расчет частичного состава элементов, входящих в композиционное покрытие. Полученные результаты хорошо совпадают с экспериментальными, особенно в тройных системах W–C–Cu, Mo–C–Cu и Ti–B–Cu. При сравнении с литературными данными наблюдается достаточно хорошая корреляция. Для двойных систем W–Cu, Mo–Cu причины отклонения состоят в приближениях модели.

Ключевые слова: математическая модель, искровая эрозия, покрытия, композит, вольфрам, молибден, углерод, титан, бор, диборид титана, медь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-135-139

В последние годы доказано, что электровзрывное напыление композиционных покрытий способствует совместному улучшению физико-механических и эксплуатационных свойств: до нескольких раз увеличиваются микротвердость, электроэрозионная стойкость, износостойкость в условиях абразивного износа и сухого трения скольжения [1, 2]. Упрочнение достигается за счет формирования покрытий с образованием мелкодисперсных фаз в вязкой металлической матрице. В работах [1 – 4] изложены результаты исследования структуры и свойств электровзрывных композиционных покрытий систем W–Cu, Mo–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu, Ti–B–Cu и TiB₂–Cu. Такие покрытия обладают высокой электроэрозионной стойкостью.

Однако до сих пор не были предложены модели электроэрозионного разрушения композиционных электровзрывных покрытий в условиях искровой эрозии. Близкие по свойствам с электровзрывными покрытиями материалы для электродов можно получать методом электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме [5 – 7]. В настоящее время получены пароконденсатные композиционные материалы на основе меди и углерода [8], хрома и меди [9, 10], несмешивающихся компонентов, например вольфрама и меди [11 – 13], серебра [14, 15]. Высокие механические свойства имеют полученные путем плазменного напыления покрытия на основе диоксида циркония [16]. Все рассмотренные системы похожи по своей структуре и свойствам.

Цель настоящей работы заключалась в построении модели электроэрозионного разрушения композиционных электровзрывных покрытий в условиях искровой эрозии.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол_а_дк и при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2.

Для объяснения и понимания результатов испытаний на электроэрозионную стойкость в условиях искровой эрозии, изложенных в работах [1–4], была предложена модель электроэрозионного разрушения испарением электродов под действием теплового потока q , который можно определить для этого случая следующим образом:

$$q = \frac{UI}{\pi R_0^2},$$

где q – тепловой поток; U – напряжение на контактах; I – разрядный ток; R_0 – радиус канала искры.

Сопrotивление контактов во время испытаний находится в интервале 40–50 мкОм. Модель строим в рамках известной задачи нагрева полупространства поверхностным нормальным импульсным источником тепла q длительностью t_n , равномерно распределенным по площади радиусом R_0 .

В настоящей работе использовали уравнение, описывающее нагрев полупространства поверхностным нормальным источником тепла, равномерно распределенным по площади радиуса R_0 ; распределение энергии импульса во времени аппроксимируем прямоугольным импульсом. В цилиндрической системе координат запишем уравнение теплопроводности [17]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} T|_{r \rightarrow \infty} &= T_0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{z \rightarrow \infty} &= 0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{z=0} &= \begin{cases} q, & r \leq R_0; \\ q, & r > R_0; \end{cases} \end{aligned}$$

и начальным условием

$$T|_{t=0} = T_0,$$

где a – температуропроводность; λ – коэффициент теплопроводности.

Решение этой задачи для плоского мгновенного источника имеет вид

$$\begin{aligned} T(r, z, t) &= \frac{qR_0}{2\lambda} \int_0^\infty J_0(xr) J_1(xr) \exp(-xz) \times \\ &\times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} - x\sqrt{at} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} + x\sqrt{at} \right) \right] \frac{1}{x} dx, \end{aligned}$$

где $J_0(xr)J_1(xr)$ – цилиндрические функции Бесселя; $\operatorname{erf}(z)$ – интеграл вероятности.

С учетом конечного времени импульса для поверхности $z = 0$ решение имеет вид

$$\begin{aligned} T_s = T(0, z, t) &= \frac{2q\sqrt{a}}{\lambda} \times \\ &\times \left[\sqrt{t} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \sqrt{t-t_n} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{z^2 + R_0^2}}{2\sqrt{at(t-t_n)}} \right) \right]; \end{aligned}$$

здесь t_n – время импульса (искрового разряда).

По температуре поверхности определяем давление паров металла: для этого уравнение Герца-Кнудсена представим в виде

$$P = P_0 \exp \left[\frac{L_i}{k} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_s} \right) \right];$$

здесь L_i – теплота испарения материала электрода; k – постоянная Больцмана; T_i – температура испарения; T_s – температура поверхности.

Считаем, что при достижении температуры испарения материал полностью покидает поверхность электрода. Так как образованное парами металла давление внутри искрового промежутка достигает значительных величин, учитываем поверхностное натяжение расплавленного металла и имеем в виду, что часть жидкого металла остается на электроде. Такое допущение не вносит каких-либо принципиальных изменений в картину процесса.

Объем «выброшенного» материала аппроксимировали объемом полусферы с радиусом, равным глубине кратера, который возникает после одиночного импульса разряда.

При расчете массы выброшенного материала учитывали тот факт, что для напыления композиционного покрытия использовали медную фольгу, так что поверхность покрытия представляет собой мозаичную поверхность, которая содержит материал наполнителя (W, Mo, W–C, Mo–C, Ti–B, TiB₂) и медь в соотношении приблизительно 1:1. Представляя, что объем нанесенного покрытия составлен из равных кубических структур, содержащих только медь и только наполнитель, был произведен расчет парциального состава элементов, входящих в покрытие. Например, для композиционного наполненного покрытия системы W–Cu весовое и атомное соотношение элементов вычисляли по следующим формулам:

$$\begin{aligned} A_W &= \frac{\rho_W}{\rho_W + \rho_{Cu}}; \quad A_{Cu} = \frac{\rho_{Cu}}{\rho_W + \rho_{Cu}}; \\ At_W &= \frac{A_W}{\mu_W} \left(\frac{1}{\frac{A_W}{\mu_W} + \frac{A_{Cu}}{\mu_{Cu}}} \right); \quad At_{Cu} = \frac{A_{Cu}}{\mu_{Cu}} \left(\frac{1}{\frac{A_W}{\mu_W} + \frac{A_{Cu}}{\mu_{Cu}}} \right); \end{aligned}$$

$$A_W = 0,318; \quad A_{Cu} = 0,682; \quad At_W = 0,426; \quad At_{Cu} = 0,574;$$

здесь $\rho_W, \rho_{Cu}, \mu_W, \mu_{Cu}, A_W, A_{Cu}, At_W, At_{Cu}$ – плотность, молярная масса, весовое и атомное содержание вольфрама и меди соответственно.

Для тройных систем выражения не приводим, так как алгоритм получения формул такой же.

Приведем состав (в ат. долях) исследуемых материалов, полученный по указанной методике:

$$\begin{aligned} W-Cu: & 0,426W + 0,574Cu; \\ Mo-Cu: & 0,533Mo + 0,467Cu; \\ W-C-Cu: & 0,253W + 0,415C + 0,332Cu; \\ Mo-C-Cu: & 0,296Mo + 0,397C + 0,317Cu; \\ Ti-B-Cu: & 0,193Ti + 0,532B + 0,274Cu; \\ TiB_2-Cu: & 0,126Ti + 0,695B + 0,179Cu. \end{aligned}$$

Расчеты проводили при следующих значениях параметров: $U = 380$ В; $I = 3$ А; $t_{и} = 150$ мкс; $R_0 = 152$ мкм [18, 19].

В расчетах энергия искры W составляла 0,171 Дж и была одинакова для всех материалов. Температура электродов из чистых материалов при такой мощности зависела от тепловых свойств материала контакта. Температура композиционных материалов равнялась температуре медной основы, так как медь также является частью композиционного покрытия.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетов показателей чистых материалов

Table 1. Calculation results of pure materials indicators

Показатель	Значение показателя для материала						
	Cu	W	Mo	Ti	B	C	TiB ₂
$T_{ч.м}, K$	1100	3428	2636	1689	2100	3613	1514
$h \cdot 10^{-5}, м$	11,60	1,23	2,83	8,21	6,25	4,62	6,98
V_{Cu}/V	1,00	5,47	3,31	4,39	4,53	0,93	4,46
m_{Cu}/m	1,00	2,55	2,91	8,74	17,63	3,12	18,35

Вычисления проводили для одного импульса разряда; после N импульсов абсолютные величины складываются, относительные – не изменяются.

Результаты расчетов температуры ($T_{ч.м}$) поверхности электродов из чистого материала, глубины слоя испарения (h) электродов из чистого материала, относительного изменения V_{Cu}/V объемной электроэрозионной стойкости электродов из чистых материалов (отношение эродированного объема медного электрода к потерянному объему электрода из других материалов), относительного изменения m_{Cu}/m массовой электроэрозионной стойкости электродов из чистых материалов (отношение эродированной массы медного электрода к массе электрода из других материалов) представлены в табл. 1, а температуры $T_{к.п}$ поверхности электродов из композиционных покрытий, потери массы m композиционного покрытия после одного импульса разряда, относительного изменения V_{Cu}/V объемной электроэрозионной стойкости электровзрывных композиционных покрытий и относительного изменения m_{Cu}/m массовой электроэрозионной стойкости электровзрывных композиционных покрытий – в табл. 2.

Таким образом, получены формулы для расчета процентного состава материала электродов, подвергнутых электроискровой эрозии. Предложена тепловая модель расчета процесса электроискровой эрозии. Полученные результаты достаточно хорошо совпадают с экспериментальными, особенно в тройных системах W–C–Cu, Mo–C–Cu и Ti–B–Cu. При сравнении с некоторыми литературными данными наблюдается достаточно хорошая степень корреляции [20]. Для двойных систем W–Cu, Mo–Cu причины отклонения состоят в приближении модели и в том, что расчет процентного содержания велся только по одному поверхностному сечению, в то время как в эксперименте при многократном повторении сечение меняется; эта ошибка имеет статистический характер.

Выводы. Предложена модель электроэрозионного разрушения композиционных электровзрывных покрытий систем W–Cu, Mo–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu, Ti–B–Cu и TiB₂–Cu в условиях искровой эрозии, происходящей при размыкании электрических кон-

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетов показателей композиционных покрытий

Table 2. Calculation results of composite coatings indicators

Показатель	Значение показателя для системы					
	W–Cu	Mo–Cu	W–C–Cu	Mo–C–Cu	Ti–B–Cu	TiB ₂ –Cu
$T_{к.п}, K$	1100	1100	1100	1100	1100	1100
$m \cdot 10^{-9}, кг$	29,4	11,5	10,1	0,33	0,16	0,94
V_{Cu}/V	3,48	3,48	8,37	8,67	7,06	9,04
m_{Cu}/m	9,22	9,21	10,81	9,13	9,10	11,10

тактов. Модель рассматривает испарение электродов под действием теплового потока, который возникает вследствие искробразования при размыкании электрических контактов. На основании расчета по этой модели определены температура поверхности, глубина слоя испарения, относительное изменение объемной электроэрозионной стойкости, относительное изменение массовой электроэрозионной стойкости электродов из чистых материалов, а также температура поверхности, потери массы композиционного покрытия после одного импульса разряда, относительное изменение объемной электроэрозионной стойкости и относительное изменение массовой электроэрозионной стойкости электровзрывных композиционных покрытий. Проведен расчет парциального состава элементов, входящих в композиционное покрытие. Полученные результаты хорошо совпадают с экспериментальными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Panin V.E., Gromov V.E., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Panin S.V. The Physical Basics of Structure Formation in Electroexplosive Coatings // *Doklady Physics*. 2017. Vol. 62. No. 2. P. 67 – 70.
- Romanov D.A., Gromov V.E., Glezer A.M., Panin S.V., Semin A.P. Structure of electro-explosion resistant coatings consisting of immiscible components // *Materials Letters*. 2017. Vol. 188. P. 25 – 28.
- Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Structure of the molybdenum–carbon–copper composite coatings produced by electroexplosive spraying followed by electron-beam treatment // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015. No. 13. P. 1134 – 1138.
- Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Structural-Phase States and Tribological Properties of Electroexplosive Composite Coatings on Copper after Electron-Beam Treatment // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. Vol. 9. No. 4. P. 699 – 705.
- Veklich A., Lebid A., Minakova R., Kryachko L., Grechanyuk N. Peculiarities of interaction of electric arc plasma and composite electrodes' working surface. – In: 21st Symposium on Physics of Switching Arc 2015. – Nove Mesto Na Morave, Czech Republic, 2015. P. 96 – 99.
- Bogdan M., Marcin H., Grechanyuk I.N., Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Xu L.J. The actual state and prospects of a high power electron beam technology for metallic and non-metallic compositions used in electric contacts and electrodes // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 875-877. P. 1437 – 1448.
- Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Kopylova, G.E. Current state and prospects of high-speed electron-beam evaporation and subsequent vacuum condensation of metals and nonmetals to produce electric contacts and electrodes // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013. Vol. 52. No. 3-4. P. 228 – 236.
- Bukhanovsky V., Rudnytsky M., Grechanyuk M., Minakova R., Zhang C. Vapour-phase condensed composite materials based on copper and carbon // *Materiali in Tehnologije*. 2016. Vol. 50. No. 4. P. 523 – 530.
- Khomenko E.V., Minakova R.V., Lesnik, N.D. Microstructural evolution of Cr-Cu composites in liquid-phase sintering // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013. Vol. 52. No. 1-2. P. 20 – 31.
- Khomenko E.V., Minakova R.V., Naida Yu.I. Analyzing the quality of grinding and mixing of copper and chromium powders in a new-type mill // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol. 51. P. 137 – 141.
- Bukhanovsky V.V., Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Mamuzich I., Kharchenko V.V., Rudnitsky N.P. Production technology, structure and properties of Cu-W layered composite condensed materials for electrical contacts // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2011. Vol. 29. No. 5. P. 561 – 644.
- Bukhanovs'kyi V.V., Rudnyts'kyi M.P., Kharchenko V.V., Minakova R.V., Grechanyuk M.I., Mamuzic, I. Relationship between composition, structure, and mechanical properties of a condensed composite of copper-tungsten system // *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 426 – 437.
- Bukhanovskii V.V., Minakova R.V., Grechanyuk I.N., Mamuzia I., Rudnitskii N.P. Effect of composition and heat treatment on the structure and properties of condensed composites of the Cu – W system // *Metal Science and Heat Treatment*. 2011. Vol. 53. P. 14 – 23.
- Babich I.L., Boretskij V.F., Kryachko L.A., Minakova R.V., Semenyshyn R.V., Veklich A.N. Thermal plasma of electric arc discharge with silver vapours: Peculiarities of spectroscopic investigations. – In: Source of the Document 19th Symposium on Physics of Switching Arc 2011, FSO 2011. 2011. P. 101 – 104.
- Babich I.L., Boretskij V.F., Kryachko L.A., Minakova R.V., Semenyshyn R.V., Veklich A.N. Plasma of electric arc between composite electrodes on silver base // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2010. No. 6. P. 141 – 143.
- Ibragimov A.R., Ilinkova T.A., Shafigullin L.N., Saifutdinov A.I. Investigation of mechanical properties of thermal coatings obtained during plasma spraying of powder zirconium dioxide // *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. Vol. 789. P. 012022 .
- Карлслю Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
- Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
- Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
- Курочкин В.Д., Минакова Р.В., Кресанова А.П. Состав и параметры искровой плазмы в воздухе с электродами из вольфрам-медной композиции // *Теплофизика высоких температур*. 1993. Т. 31. Вып. 5. С. 693 – 697.

Поступила 24 ноября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 2, pp. 135–139.

MODEL OF ELECTROEROSION DESTRUCTION OF COMPOSITE ELECTROEXPLOSIVE COATINGS IN THE CONDITIONS OF SPARK EROSION

D.A. Romanov, E.V. Protopopov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. In this paper, the authors propose a model of electroerosion destruction of composite electroexplosive coatings of W–Cu, Mo–Cu, W–Cu–Cu, Mo–Cu–Cu, Ti–B–Cu, and TiB₂–Cu systems under

spark erosion that occurs when electrical contacts are opened. The model is associated with the evaporation of electrodes under the influence of heat flow, which arises from sparking when electrical contacts are opened. In constructing this model, the resistance of electrical contacts during the tests was in the range from 40 to 50 μΩ. The model was constructed in the framework of the problem of heating a half-space by a surface normal pulsed heat source uniformly distributed

over an area of a certain radius and with certain duration of action. Distribution of the pulse energy in time was approximated by a rectangular pulse. The heat equation was solved in a cylindrical coordinate system for a plane instantaneous source with allowance for a finite time of the pulse. The vapor pressure of the metal was determined from the surface temperature. The calculations were carried out at a voltage of 380 V, a current of 3 A, a spark discharge time of 150 μ s and a radius of the contact spot of a spark discharge with a surface of 152 μ m. As a result, there were determined: the surface temperature of electrodes from pure metal, the surface temperature of electrodes from composite coatings, the depth of the evaporation layer of electrodes from pure materials, the loss of mass of the composite coating after a single discharge pulse, the relative change in the volumetric electroerosion resistance of electrodes from pure materials, durability of electrodes from pure materials, relative change in volumetric erosion resistance of electroexplosive composite coatings and the relative change in mass spark resistance of electroexplosive composite coatings. The partial composition of the elements included in the composite coating was calculated. The obtained results are in good agreement with the experimental results, especially in the W–C–Cu, Mo–C–Cu and Ti–B–Cu ternary systems. Comparison with data from the literature has a fairly good degree of correlation. Deviations for the binary W–Cu, Mo–Cu systems have causes in the model approximations.

Keywords: mathematical model, spark erosion, coatings, composite, tungsten, molybdenum, carbon, titanium, boron, titanium diboride, copper.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-135-139

REFERENCES

- Panin V.E., Gromov V.E., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Panin S.V. The physical basics of structure formation in electroexplosive coatings. *Doklady Physics*. 2017, vol. 62, no. 2, pp. 67–70.
- Romanov D.A., Gromov V.E., Glezer A.M., Panin S.V., Semin A.P. Structure of electro-explosion resistant coatings consisting of immiscible components. *Materials Letters*. 2017, vol. 188, pp. 25–28.
- Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Structure of the molybdenum–carbon–copper composite coatings produced by electroexplosive spraying followed by electron-beam treatment. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 13, pp. 1134–1138.
- Romanov D.A., Olesyuk O.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Structural-phase states and tribological properties of electroexplosive composite coatings on copper after electron-beam treatment. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015, vol. 9, no. 4, pp. 699–705.
- Veklich A., Lebid A., Minakova R., Kryachko L., Grechanyuk N. Peculiarities of interaction of electric arc plasma and composite electrodes' working surface. In: *21st Symposium on Physics of Switching Arc 2015. Nove Mesto Na Morave, Czech Republic*, 2015, pp. 96–99.
- Bogdan M., Marcin H., Grechanyuk I.N., Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Xu L.J. The actual state and prospects of a high power electron beam technology for metallic and non-metallic compositions used in electric contacts and electrodes. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 875-877, pp. 1437–1448.
- Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Kopylova, G.E. Current state and prospects of high-speed electron-beam evaporation and subsequent vacuum condensation of metals and nonmetals to produce electric contacts and electrodes. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013, vol. 52, no. 3-4, pp. 228–236.
- Bukhanovsky V., Rudnitsky M., Grechanyuk M., Minakova R., Zhang C. Va-pour-phase condensed composite materials based on copper and carbon. *Materiali in Tehnologije*. 2016, vol. 50, no. 4, pp. 523–530.
- Khomenko E.V., Minakova R.V., Lesnik, N.D. Microstructural evolution of Cr-Cu composites in liquid-phase sintering. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2013, vol. 52, no. 1-2, pp. 20–31.
- Khomenko E.V., Minakova R.V., Naida Yu.I. Analyzing the quality of grind-ing and mixing of copper and chromium powders in a new-type mill. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012, vol. 51, pp. 137–141.
- Bukhanovsky V.V., Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Mamuzich I., Kharchenko V.V., Rudnitsky N.P. Production technology, structure and properties of Cu–W layered composite condensed materials for electrical contacts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2011, vol. 29, no. 5, pp. 561–644.
- Bukhanovs'kyi V.V., Rudnits'kyi M.P., Kharchenko V.V., Minakova R.V., Grechanyuk M.I., Mamuzic, I. Relationship between composition, structure, and mechanical properties of a condensed composite of copper-tungsten system. *Strength of Materials*. 2011, vol. 43, no. 4, pp. 426–437.
- Bukhanovskii V.V., Minakova R.V., Grechanyuk I.N., Mamuzic I., Rudnitskii N.P. Effect of composition and heat treatment on the structure and properties of condensed composites of the Cu–W system. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011, vol. 53, pp. 14–23.
- Babich I.L., Boretskij V.F., Kryachko L.A., Minakova R.V., Semenyshyn R.V., Veklich A.N. Thermal plasma of electric arc discharge with silver vapours: Peculiarities of spectroscopic investigations. In: *Source of the Document 19th Symposium on Physics of Switching Arc 2011, FSO 2011*. 2011, pp. 101–104.
- Babich I.L., Boretskij V.F., Kryachko L.A., Minakova R.V., Semenyshyn R.V., Veklich A.N. Plasma of electric arc between composite electrodes on silver base. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2010, no. 6, pp. 141–143.
- Ibragimov A.R., Ilinkova T.A., Shafigullin L.N., Saifutdinov A.I. Investigation of mechanical properties of thermal coatings obtained during plasma spraying of powder zirconium dioxide. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2017, vol. 789, pp. 012022.
- Carlsaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, London, 1947. (Russ.ed.: Carlsaw H., Jaeger J. *Teploprovodnost' tverdykh tel*. Moscow: Nauka, 1964, 488 p.)
- Lozanskii E.D., Firsov O.B. *Teoriya iskry* [Theory of spark]. Moscow: Atomizdat, 1975, 272 p. (In Russ.).
- Kesaev I.G. *Katodnye protsessy elektricheskoi dugi* [Cathodic processes of electric arc]. Moscow: Nauka, 1968, 244 p. (In Russ.).
- Kurochkin V.D., Minakova R.V., Kresanova A.P. Composition and parameters of spark plasma in air with electrodes of tungsten-copper composition. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1993, vol. 31, no. 5, pp. 693–697. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 16-32-60032 Mol_a_dk and by the Grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists – candidates of sciences MK-1118.2017.2.

Information about the authors:

D.A. Romanov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (romanov_da@physics.sibsiu.ru)

E.V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (protopopov@sibsiu.ru)

Received November 24, 2017