УДК 621.785:669.1.08.29

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ Cu-Mo ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ*

Д.А. РОМАНОВ*[1]*, канд. техн. наук, доцент
О.В. ОЛЕСЮК*[1]*, доцент
Е.А. БУДОВСКИХ*[1]*, доктор техн. наук, профессор
В.Е. ГРОМОВ*[1]*, доктор физ.-мат. наук, профессор
Ю.Ф. ИВАНОВ*[2]*, доктор физ.-мат. наук, профессор
А.Д. ТЕРЕСОВ*[2]*, м.н.с.
([1]*СибГИУ, г. Новокузнецк,* [2]*ИСЭ СО РАН, ТПУ, г. Томск*)

Получена 12 ноября 2013
Рецензирование 15 января 2014
Принята к печати 20 января 2014

Романов Д.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail**:** romanov_da@physics.sibsiu.ru

Иванов Ю.Ф. – 634055 г. Томск, проспект Академический, 2/3,
Институт сильноточной электроники СО РАН,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
e-mail**:** yufi55@mail.ru

Перспективным направлением развития способов электровзрывного напыления композиционных материалов является модифицирование этих покрытий электронными пучками. В последние годы разрабатывается способ обработки поверхности многофазными плазменными струями продуктов электрического взрыва проводников. В настоящей работе показано, что импульсно-периодическая электронно-пучковая обработка поверхности электровзрывных покрытий системы Cu-Mo приводит к сглаживанию рельефа поверхности покрытий и формированию их двухслойного строения. Поверхностный слой толщиной 30…50 мкм после электронно-пучкового переплавления характеризуется бездефектной структурой и образован молибденовыми ячейками со средним размером 1,3 мкм, которые объединены в зерна с размерами 10…22 мкм. Размеры медных прослоек в нем составляют 0,1…0,2 мкм. Содержание молибдена и меди в них составляет 70 и 30 ат. % соответственно.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электронно-пучковая обработка, псевдосплав, молибден, медь, структура.

Введение

Композиционные материалы системы молибден-медь обладают стойкостью к электрической эрозии, на порядок более высокой по сравнению с контактной медью [1]. Известны способы получения объемных материалов этой системы [2]. Для ряда практических применений, например упрочнения контактных поверхностей средне- и тяжелонагруженных выключателей и коммута-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

ционных аппаратов, перспективно формирование молибден-медных поверхностных слоев, поскольку в этом случае важна электроэрозионная стойкость поверхности контакта, а не всего объема [3,4]. В настоящее время разработаны физические основы электровзрывного напыления (ЭВН) покрытий системы молибден-медь [5]. Перспективным направлением развития способов ЭВН композиционных материалов является модифицирование этих покрытий электронными пучками [6]. В последние годы разрабатывается способ обработки поверхности многофазными плазменными струями продуктов электрического взрыва проводников. Путем изменения параметров воздействия этот способ позволяет как наносить покрытия из продуктов взрыва проводников, так и осуществлять формирование поверхностных слоев, легированных продуктами взрыва [7, 8].

Цель настоящей работы заключается в изучении особенностей структуры электровзрывных композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы Cu-Mo после электронно-пучковой обработки с оплавлением поверхности.

Материалы и методы исследования

Электровзрывное напыление покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, которая описана в работе [5]. Установка включает в себя емкостный накопитель энергии и импульсный плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы электродов с размещенным на них проводником, разрядной камеры, локализующей продукты взрыва и переходящей в сопло, по которому они истекают в вакуумную технологическую камеру с остаточным давлением 100 Па. Электровзрыв происходит в результате пропускания через проводник тока большой плотности при разряде накопителя.

Покрытия наносили на электрические контакты из электротехнической меди марки М00 с размерами 20×30×2 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности [9]. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого материала для нанесения покрытий, который в данной работе представлял собой двухслойную медную фольгу с заключенной в ней навеской порошка молибдена. Поглощаемая плотность мощности при напылении составляла 4,1 ГВт/м^2, диаметр молибденового сопла – 20 мм, расстояние образца от среза сопла – 20 мм. Массы фольги и порошковой навески составляли 238 и 272 мг соответственно.

Модифицирование покрытий осуществляли при импульсно-периодической электронно-пучковой обработке (ЭПО) в режимах, вызывающих оплавление поверхностного слоя покрытий с последующим высокоскоростным охлаждением за счет отвода тепла в объем материала (см. таблицу). Использовали установку «СОЛО», разработанную и созданную в Институте сильноточной электроники СО РАН [10].

Режимы ЭПО

Номер режима	Параметры ЭПО		
	E_s, Дж/см^2	t, мкс	N, имп
1	45	100	10
2	50	100	10
3	55	100	10
4	60	100	10
5	60	200	20

Примечание. E_s – поверхностная плотность энергии; t – длительность импульсов; N – количество импульсов. Частота следования импульсов составляла 0,3 Гц.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50, оснащенного приставкой для рентгеноспектрального анализа. Перед микроскопическими исследованиями шлифы подвергали химическому травлению раствором следующего состава: FeCl3 – 3 г, HCl – 2,5 мл, C2H5OH – 100 мл.

Результаты и обсуждение

Исследования поверхности облучения, осуществленные методами СЭМ, показали, что обработка образца электронным пучком при всех режимах обработки приводит к существенным преобразованиям поверхности образца. В центральной части зоны воздействия пучка электро-

нов (область, размеры которой увеличиваются от 10 мм при плотности энергии пучка электронов 45 Дж/см^2 до 18 мм при 60 Дж/см^2) исчезают микрокапли, микрократеры и микротрещины, описанные ранее в [10]. Рельеф поверхности выглаживается (рис. 1). За пределами центральной зоны ЭПО рельеф поверхности электровзрывного покрытия также сглаживается и характеризуется различной степенью однородности.

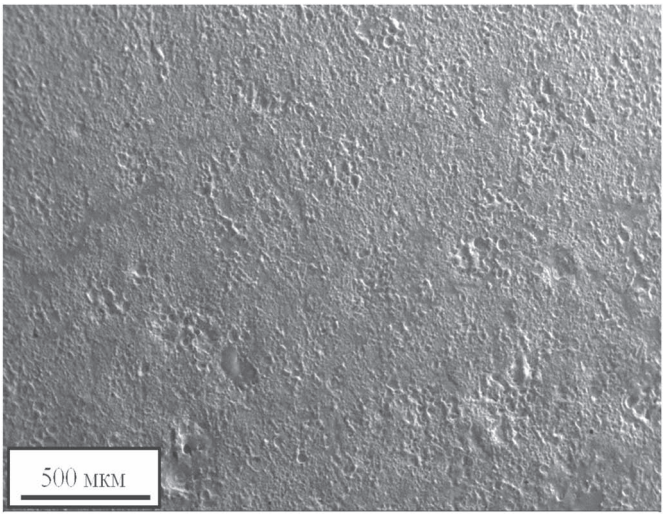

Рис. 1. Рельеф поверхности электровзрывного композиционного покрытия системы Cu-Mo, модифицированного высокоинтенсивным электронным пучком. Сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах

На поверхности покрытий после ЭПО выявляется поликристаллическая структура, средний размер зерен которой увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов от 10 мкм при 45 Дж/см^2 до 22 мкм при 50 Дж/см^2. В зернах выявляется ячеистая структура, характерная для скоростной кристаллизации [11]. Средний поперечный размер ячеек составляет 1,3 мкм (рис. 2).

Соответственно эволюции морфологии поверхности облучения изменяется и распределение элементов в структуре поверхностного слоя. В центральной зоне фиксируется композиционное покрытие с однородным распределением молибдена и меди в количестве 70 и 30 ат. % соответственно. На границе центральной зоны и за ее пределами наблюдаются более крупные области структурно-свободных молибдена или меди. Таким образом, все использованные режимы ЭПО позволяют формировать однородные и гладкие поверхностные слои, обладающие микрокристаллической двухфазной структурой.

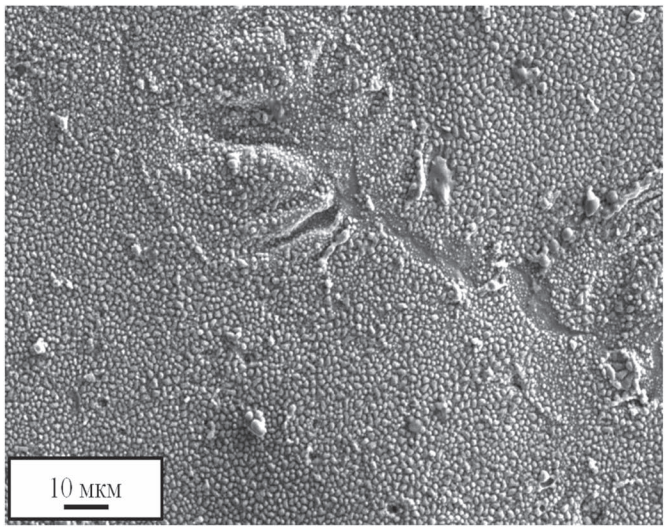

Рис. 2. Ячеистая структура поверхности электровзрывного композиционного покрытия системы Cu-Mo, модифицированного высокоинтенсивным электронным пучком. Сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах

После ЭВН толщина покрытий изменяется в пределах от 100 до 125 мкм. После ЭПО в структуре покрытия выделяются три слоя (рис. 3): I – поверхностный слой покрытия, переплавленный при ЭПО; II – промежуточный слой, структурные изменения в котором происходили в твердом состояния; III – слой термического влияния основы, в котором химическим травлением границы зерен выявляются хуже, чем в глубине.

Электронно-пучковая обработка поверхности покрытия сопровождается не только выгла-

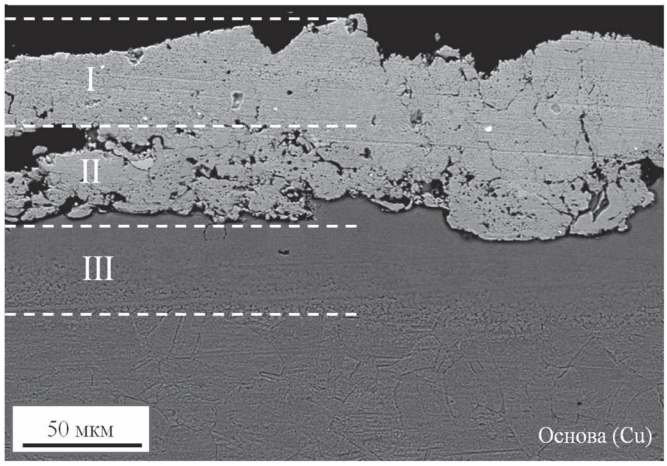

Рис. 3. Структура поперечного сечения электровзрывного композиционного покрытия системы Cu-Mo и последующей обработки электронным пучком: I – слой покрытия после ЭПО; II – слой покрытия, не затронутый ЭПО; III – слой термического влияния. Сканирующая электронная микроскопия в обратноотраженных электронах

живанием рельефа поверхности, но и приводит к выравниванию толщины модифицированного слоя I (рис. 3). Толщина модифицированных слоев после ЭПО изменяется в пределах от 30 до 50 мкм и незначительно уменьшается с ростом плотности энергии пучка электронов.

Электронно-пучковая обработка, сопровождающаяся переплавлением слоя I электровзрывного покрытия, приводит к формированию композиционной дисперсно-упрочненной [12] структуры по всему сечению слоя (рис. 4, *а*, слой I на рис. 3). Дефектов в виде микропор и микротрещин в нем не наблюдается. Размеры включений меди в молибденовой матрице изменяются в пределах от 0,1 до 0,2 мкм, при этом размеры включений меди в слое II изменяются в пределах от 0,1 до 2,0 мкм (слой II на рис. 3, рис. 4, *б*). Таким образом, импульсно-периодическое переплавление поверхностного слоя I приводит к формированию в нем более дисперсной и однородной структуры.

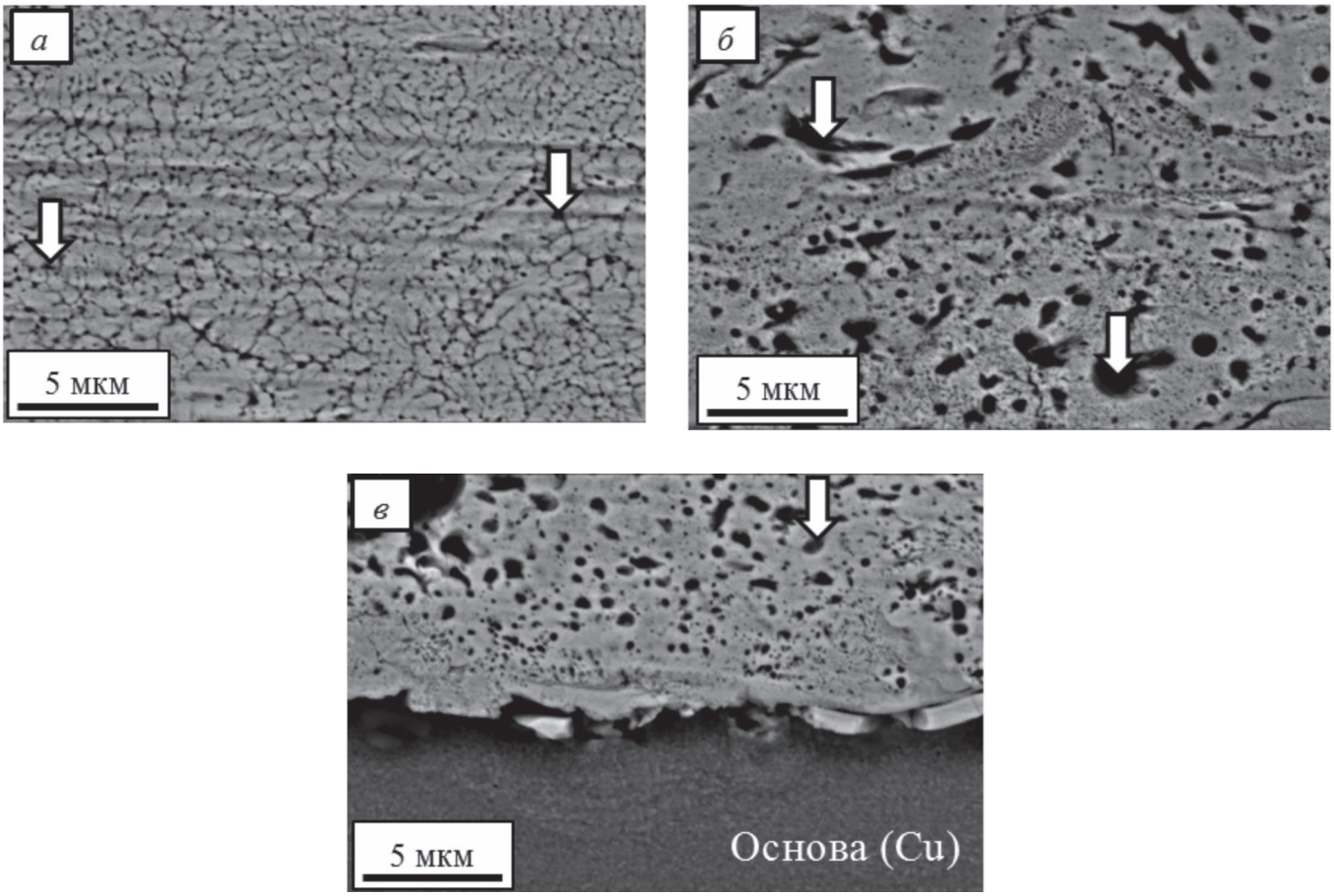

Рис. 4. Структура поперечного сечения медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН композиционного покрытия системы Cu-Mo и последующей обработке электронным пучком:

а – слой покрытия и последующей ЭПО; *б* – слой покрытия, не затронутый ЭПО; *в* – граница электровзрывного покрытия с основой. Стрелками показаны частицы меди. Сканирующая электронная микроскопия в обратноотраженных электронах

Выводы

Электровзрывным методом сформированы покрытия из несмешивающихся компонентов системы Cu-Mo толщиной 100…125 мкм. Содержание молибдена и меди в них составляет 70 и 30 ат. % соответственно. Проведена электронно-пучковая обработка поверхности покрытий, приведшая к выглаживанию рельефа поверхности покрытий и формированию их двухслойного строения. Поверхностный слой толщиной 30…50 мкм после электронно-пучкового переплавления характеризуется бездефектной структурой и образован молибденовыми ячейками со средним размером 1,3 мкм, которые объединены в зерна с размерами 10…22 мкм. Размеры медных прослоек в нем составляют 0,1…0,2 мкм. В нижележащем слое структура более грубая. Размеры

медных прослоек в нем изменяются в пределах от 0,1 до 2,0 мкм. Четкой границы между первым и вторым слоем не наблюдается.

Список литературы

1. *Анисимов А.Г., Мали В.И.* Исследование возможности электроимпульсного спекания порошковых наноструктурных композитов // Физика горения и взрыва. – 2010. – № 2. – С. 135–139.

2. *Способ* получения молибден-медного композиционного материала. Пат. 2292988 Рос. Федерация. № 2005121106/02; заявл. 05.07.2005; опубл. 10.02.2007.– Бюл. № 4.–5 с.

3. *Конденсированные* из паровой фазы композиционные материалы на основе меди и молибдена для электрических контактов. Структура, свойства, технология. Современное состояние и перспективы применения технологии электронно-лучевого высокоскоростного испарения-конденсации для получения материалов электрических контактов. Сообщение 1 / Н.И. Гречанюк, В.А. Осокин, И.Н. Гречанюк, Р.В. Минакова // Современ. электрометаллургия. – 2005. – № 2. – С. 28–35.

4. *Основы* электронно-лучевой технологии получения материалов для электрических контактов. Их структура, свойства. Сообщение 2 / Н.И. Гречанюк, И.Н. Гречанюк, В.А. Осокин и др. // Современ. электрометаллургия. – 2006. – № 2. – С. 9–19.

5. *Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.* Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.

6. *Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A.* Chapter 6 in Book “Materials surface processing by directed energy techniques” p. 205-240. / Ed. by Y. Pauleau, Elsevier, 2006, 736 p.

7. *Будовских Е.А., Карпий С.В., Громов В.Е.* Формирование поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании // Известия РАН. Серия физическая – 2009. – Т. 73. – № 9. – С. 1324–1327.

8. *Прочность* и пластичность материалов при внешних энергетических воздействиях / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2010. – 218 с.

9. *Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е.* Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 301 с.

10. *Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н.* Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения // Структура и свойства перспективных металлических материалов» / под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – 580 с. – Гл. 13. – С. 345–382.

11. *Глезер А.М., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шаркеев Ю.П.* Наноматериалы: структура, свойства, применение. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2010. – 423 с.

12. *Мэттьюз М., Ролингс Р.* Композиционные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

OBRABOTKA METALLOV
(METAL WORKING • MATERIAL SCIENCE)
N 1(62), January – March 2014, Pages 54–60

Structure of electroexplosive composite coatings, consisting of incompatible components of Cu-Mo-system, after electron-beam treatment

Romanov D.A.[1] Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru
Olesyuk O.V.[1], Associate Professor
Budovskikh E.A.[1], D.Sc. (Engineering), Professor
Gromov V.E.[1], D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Ivanov Yu.F.[2, 3], D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: yufi55@mail.ru
Teresov A.D.[2, 3], Research Assistant

[1]Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation
[2]Institute of High Current Electronics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademichesky Avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation
[3]National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Received 12 November 2013
Revised 15 January 2014
Accepted 20 January 2014

Abstract

Modification of the electroexplosive composite coatings by electron beam is the perspective direction in the development of methods of electroexplosive spattering of composite materials. In recent years the method of the surface treatment by the multiphase plasma jets of electrical conductors explosion has been developed. In this paper it is showed, that repetitively-pulsed electron-beam treatment of the electroexplosive coatings of the Cu-Mo-system leads to a smoothing of the coatings surface relief and formation of its' two-layer structure. Surface layer with a thickness of 30-50 μm after electron-beam refusion is characterized by a defect-free structure and is formed by molybdenum cells with an average size of 1.3 μm, which is combined in grains with the size of 10-22 μm. Thickness of the copper layers in it is 0.1-0.2 μm. Molybdenum and copper content in it is 70 and 30 at. % respectively.

Keywords: electroexplosive spattering, electron beam treatment, pseudoalloy, molybdenum, copper, structure.

References

1. Anisimov A.G., Mali V.I. Issledovanie vozmozhnosti jelektroimpul'snogo spekanija poroshkovyh nanostrukturnyh kompozitov [Possibility of electric-pulse sintering of powder nanostructural composites]. *Fizika gorenija i vzryva - Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2010, no. 2, pp. 135–139.

2. Tihij G.A., e.a. *Sposob poluchenija molibden-mednogo kompozicionnogo materiala* [A method for producing a molybdenum-copper composite material]. Patent RF, no. 2005121106/02, 2007.

3. Grechanjuk N.I., Osokin V.A., Grechanjuk I.N., Minakova R.V. Kondensirovannye iz parovoj fazy kompozicionnye materialy na osnove medi i molibdena dlja jelektricheskih kontaktov. Struktura, svojstva, tehnologija. Sovremennoe sostojanie i perspektivy primenenija tehnologii jelektronno-luchevogo vysokoskorostnogo isparenija-kondensacii dlja poluchenija materialov jelektricheskih kontaktov. Soobshhenie 1 [The condensed vapor from composite materials based on copper and molybdenum, for electrical contacts. The structure, properties and technology. Current state and prospects of technology of high-speed electron-beam evaporation-condensation materials for electrical contacts. Report 1]. *Sovremennaja jelektrometallurgija*, Kiev, Publishing house "Paton", 2005, no. 2, pp. 28–35.

4. Grechanjuk N.I., Grechanjuk I.N., Osokin V.A. e.a. Osnovy jelektronno-luchevoj tehnologii poluchenija materialov dlja jelektricheskih kontaktov. Ih struktura, svojstva. Soobshhenie 2 [Fundamentals of electron beam technology to obtain materials for electrical contacts. Their structures and properties. Report 2]. *Sovremennaja jelektrometallurgija*, Kiev, Publishing house "Paton", 2006, no. 2, pp. 9–19.

5. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. *Jelektrovzryvnoe napylenie jelektro-jerozionnostojkih pokrytij: formirovanie struktury, fazovogo sostava i svojstv jelektrojerozionnostojkih pokrytij metodom jelektrovzryvnogo napylenija* [Electro-detonation spraying of electro-erosion-resistant coatings: structure formation, phase composition and properties of electro-erosion-resistant coatings by electro-detonation spraying], Saarbrucken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 170 p.

6. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Chapter 6 in Book "Materials surface processing by directed energy techniques". Ed. by Y. Pauleau. Elsevier, 2006, pp. 205-240.

7. Budovskikh E.A., Karpij S.V., Gromov V.E. Formirovanie poverhnostnyh sloev metallov i splavov pri jelektrovzryvnom legirovanii [Formation of metal and alloy surface layers at electroexplosive alloying]. Izvestija RAN. *Serija fizicheskaja – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2009, Vol. 73, no. 9, pp. 1324–1327.

8. *Prochnost' i plastichnost' materialov pri vneshnih jenergeticheskih vozdejstvijah* [Strength and ductility of materials under external influences energy]. Edited by V.E. Gromov. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2010. 218 p.

9. Bagautdinov A.Ja., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy jelektrovzryvnogo legirovanija metallov i splavov* [Physical basis of Electro-detonation doping metals and alloys]. Novokuznetsk, SibSIU, 2007. 301 p.

10. Ivanov Yu.F., Koval'N.N. *Nizkojenergeticheskie jelektronnye puchki submillisekundnoj dlitel'nosti: poluchenie i nekotorye aspekty primenenija v oblasti materialovedenija* [Low-energy electron beams submillisekundnoy duration: Preparation and some aspects of the application in the field of materials]. *Glava 13 v knige «Struktura i svojstva perspektivnyh metallicheskih materialov». S.345–382. Pod obshh. red. A.I. Potekaeva* [Chapter 13 in the book "Structure and properties of advanced metallic materials." pp. 345-382. Under total. Ed. A.I. Potekaev]. Tomsk, NTL Publ., 2007. 580 p.

11. Glezer A.M., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sharkeev Yu.P. *Nanomaterialy: struktura, svojstva, primenenie* [Nanomaterials: Structure, properties and application]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2010. 423 p.

12. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite Materials: Engineering and Science*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering Ser., Woodhead Publishing Limited, 1999. 480 p. (Russ. ed.: Mjett'juz F.L, Rolings R.D *Kompozicionnye materialy. Mehanika i tehnologija*. Moscow, Tehnosfera Publ., 2004. 408 p.).