

Формирование электровзрывных износостойких покрытий с использованием электронно-пучковой обработки

Д. А. Романов, О. В. Олесюк, Е. А. Будовских, В. Е. Громов

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, РФ,
e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru

Исследовано влияние обработки высокоинтенсивным электронным пучком поверхностей покрытий из композиций на основе меди, нанесенных электровзрывным напылением. Изучены их состав, структура и трибологические свойства в паре с контртелом из твердого сплава ВК8. Установлено, что наилучшими свойствами обладают модифицированные покрытия состава Мо—Си. Эксплуатационные характеристики контактов из меди с модифицированными покрытиями всех исследованных составов на порядок выше, чем у серийных контактов без покрытия.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электронно-пучковая обработка, структура, износостойкость, электророзионная стойкость.

Электровзрывное напыление (ЭВН) покрытий проводили на модернизированной установке ЭВУ 60/10М [1]. Покрытия наносили на медные электрические контакты командоконтроллера ККТ 61 площадью 1,5 см². Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности [1—3]. Электровзрывное напыление осуществляли с использованием композиционного электрически взрываемого проводника [6]. Композиционный проводник в данной работе представлял собой двухслойную медную фольгу с размещенной в ней навеской порошков молибдена или молибдена и графита, вольфрама или вольфрама и графита, диборида титана. Состав покрытий представлен в табл. 1. Поглощаемая плотность мощности при напылении составляла 4,1 ГВт/м², диаметр медного сопла — 20 мм, расстояние образца от среза сопла — 20 мм, масса порошков молибдена, вольфрама и диборида титана — 272 мг каждого, графита — 27 мг, меди — 238 мг.

Т а б л и ц а 1. Параметры электронно-пучковой обработки покрытий

Состав покрытия	E_S , Дж/см ²	t , мкс	N , имп.
Cu—Mo	60	100	10
Cu—Mo—C	60	200	20
Cu—W	60	100	10
Cu—W-C	60	200	20
Cu—TiB ₂	60	200	20

Примечание: E_S — плотность энергии пучка электронов; t , N — длительность и количество импульсов.

© Д. А. Романов, О. В. Олесюк, Е. А. Будовских, В. Е. Громов, 2014

Модифицирование поверхности электровзрывных покрытий осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком, позволяющим переплавлять поверхностный слой толщиной до 50 мкм с последующим высокоскоростным охлаждением за счет отвода тепла в объем материала. Использовали установку СОЛО Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН [7]. Режимы электронно-пучковой обработки (ЭПО) покрытий представлены в табл. 1.

Морфологию структуры модифицированного слоя исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50. Анализ фазового состава и дефектной субструктуры поверхностного слоя покрытия, плавящегося при электронно-пучковой обработке, проводили методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) на приборе ЭМ-125. Фольги готовили из пластинок, вырезанных параллельно поверхности покрытия и расположенных на расстоянии 25—30 мкм от поверхности облучения, то есть в слое, модифицированном электронным пучком, как показали предварительно выполненные исследования структуры поперечных шлифов. Трибологические свойства (износостойкость и коэффициент трения) покрытий изучали в геометрии диск-штифт с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатных температуре и влажности. В качестве контртела использовали шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 3 мм, диаметр трека — 6 мм, скорость вращения — 2,5 см/с, нагрузка — 3 Н, дистанция до остановки — 38,6 м, количество оборотов — 3000.

Электронно-пучковая обработка электровзрывных электроэрозионно стойких покрытий независимо от элементного состава и режима облучения сопровождается плавлением слоя толщиной 30—50 мкм. Поверхность облучения выглаживается, исчезают микрокапли, микрократеры и микротрещины (рис. 1, *a*) и формируется поликристаллическая структура, размер зерен которой при плотности энергии пучка электронов 60 Дж/см² (100 мкс, 10 имп.) изменяется в пределах 3—40 мкм. Увеличение длительности воздействия пучка электронов до 200 мкс (20 имп.) при

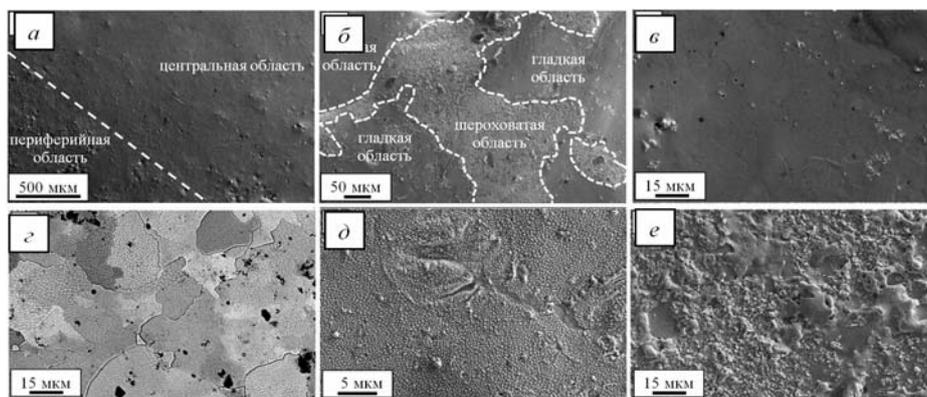


Рис. 1. Характерное СЭМ изображение поверхности электровзрывных композиционных покрытий после ЭПО: *a* — структура на границе (показана пунктиром) центральной и периферийной областей; *b* — структура центральной области ЭПО (граница между областями с гладким и шероховатым рельефом обозначена пунктирной линией); *в, г* — разнотернистая поликристаллическая структура в центральной области ЭПО; *д* — ячеистая структура; *е* — область с шероховатым рельефом.

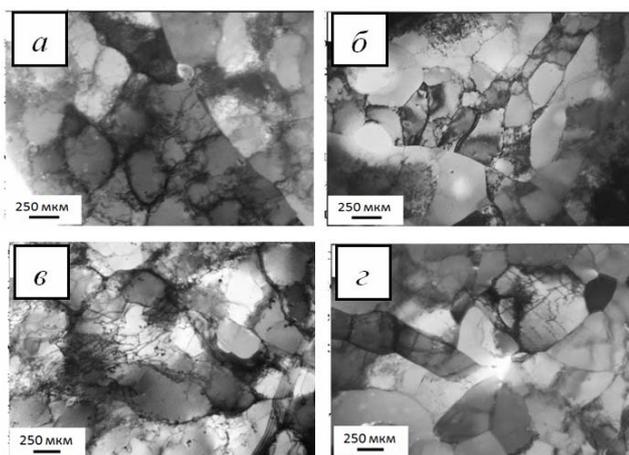


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение дислокационной субструктуры, формирующейся в покрытии, синтезированном ЭВН и обработанном импульсным электронным пучком: *a* — ячеистая; *б* — полосовая; *в* — фрагментированная; *г* — субзеренная.

этой же плотности энергии пучка электронов приводит к образованию более однородной зеренной структуры (размер зерен изменяется в пределах 10—20 мкм). В объеме зерен независимо от плотности энергии пучка электронов наблюдается структура ячеистой кристаллизации, которая характерна для материала, охлажденного с высокими скоростями. Размер ячеек изменяется в пределах 0,25—0,5 мкм (рис. 2, *д*).

Независимо от фазового состава покрытия и режима облучения электронным пучком выявлены следующие виды субструктуры (рис. 2): ячеистая, полосовая, фрагментированная, субзеренная, а также зерна с хаотически распределенными дислокациями и дислокациями, формирующими сетки. Хаотически распределенные дислокации и дислокации, формирующие сетки, обнаружены также и во всех указанных субструктурах. Увеличение длительности импульса воздействия пучка (от 100 до 200 мкс) и количества импульсов (с 10 до 20) способствовало образованию дислокационной субструктуры с более совершенными границами. Преимущественным типом дислокационной субструктуры во всех покрытиях (исключая покрытие состава W—C—Cu) является полосовая субструктура.

Электронно-пучковая обработка покрытий систем Mo—Cu и W—Cu приводит к формированию композиционной наполненной структуры по всему сечению переплавляемого слоя (рис. 3), получению в нем более дисперсной и однородной структуры по сравнению с нижележащим слоем. Размеры включений вольфрама или молибдена в матрице уменьшаются в 2—4 раза по сравнению с их размерами сразу после ЭВН. ПЭМ исследования выявили, что основной фазой покрытий систем Mo—Cu и W—Cu является твердый раствор на основе меди. В объеме зерен меди и на границах обнаружены частицы вторых фаз. В покрытиях выявлены исключительно частицы молибдена или вольфрама. Частицы имеют округлую форму и по размерам могут быть разделены на два класса: частицы исходного порошка, не растворившиеся в процессе облучения, размеры которых изменяются в пределах 80—150 нм, и частицы, выделившиеся при кристаллизации расплава, размеры которых изменяются в пределах 10—15 нм.

Особенности структуры покрытий системы TiB₂—Cu аналогичны таковым в системах Mo—Cu и W—Cu. Однако в этих покрытиях методом ПЭМ выявлены наряду с частицами TiB₂ частицы состава Ti₂B₅. Это

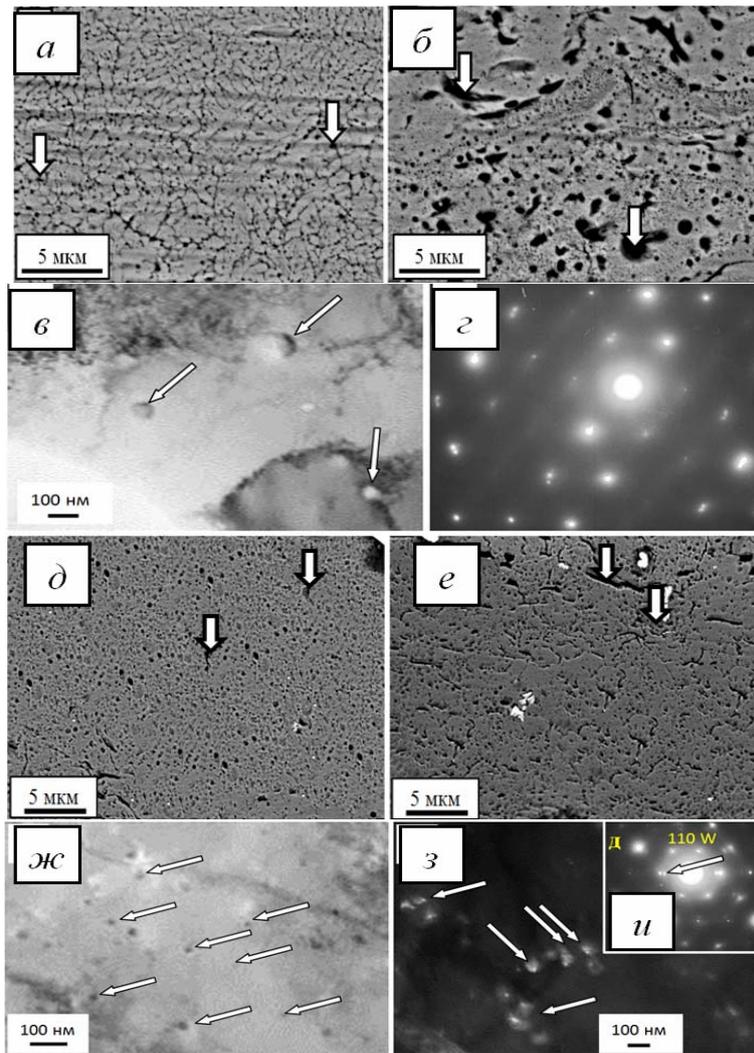


Рис. 3. Структура поперечного сечения медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН композиционного покрытия систем Mo—Cu (a—г), W—Cu (д—и): a, в, г, д, ж—и — слой покрытия, подвергнутый ЭПО; б, е — слой покрытия, не затронутый ЭПО; в, ж — светлопольные изображения; г, и — микроэлектроннограммы; з — темное поле, полученное в рефлексе [110]W (рефлекс указан на (и) стрелкой). Стрелками указаны частицы второй фазы.

указывает на частичное растворение порошка TiB_2 при ЭПО и его повторное выделение в составе Ti_2B_5 .

В покрытиях составов Mo—C—Cu и W—C—Cu следовало ожидать формирования карбидной фазы. Действительно, выполненные исследования выявили частицы карбида молибдена состава Mo_2C и карбида вольфрама состава WC (рис. 4). В обоих случаях размеры частиц карбидной фазы изменяются в пределах 10—30 нм.

Выполнены трибологические испытания покрытий, сформированных на меди электровзрывным методом и облученных высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Определены скорость износа при сухом трении и коэффициент трения покрытия о контртело (твердый сплав BK8).

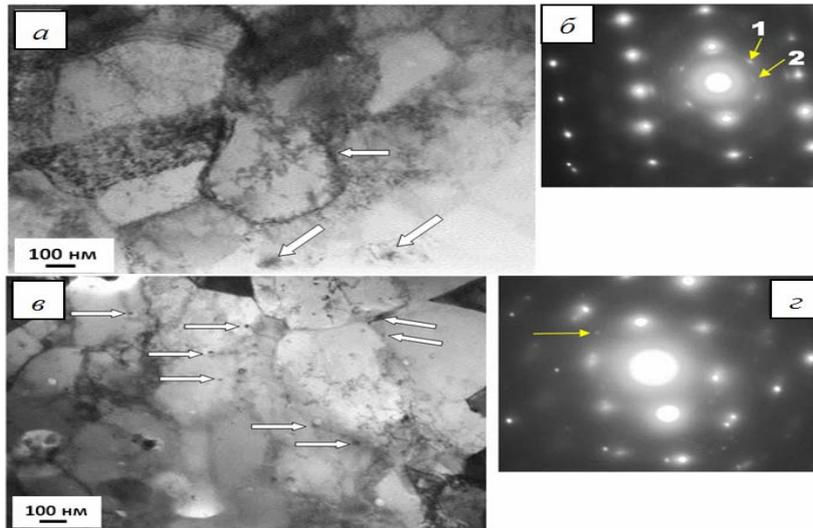


Рис. 4. ПЭМ изображение структуры электровзрывных покрытий систем Mo—C—Cu (а, б) и W—C—Cu (в, г) после ЭПО: а, в — светлое поле; б, г — микроэлектронogramмы. Стрелками указаны частицы карбида Mo₂C (а); рефлексы карбида Mo₂C (б): 1 — [011], 2 — [001]; частицы карбида WC (в); рефлекс карбида WC [001] (г).

Результаты измерений скорости износа V и средней величины коэффициента трения μ покрытий представлены на рис. 5. Видно, что обе характеристики покрытия существенным образом зависят от его элементного состава. Максимальная скорость износа выявлена у покрытия состава Cu—W, минимальная — у покрытия Cu—Mo. Увеличение скорости износа коррелирует с ростом средней величины коэффициента трения: чем выше коэффициент трения, тем интенсивнее износ материала. На рис. 6 приведены типичные зависимости коэффициента трения от времени испытания (длины пройденного контртелом пути или числа оборотов образца относительно контртела из твердого сплава ВК8) для исследуемых покрытий, в табл. 2 — численные характеристики коэффициента трения. Анализ результатов показал, что изменение коэффициента трения покрытий в процессе испытания зависит от его элементного состава.

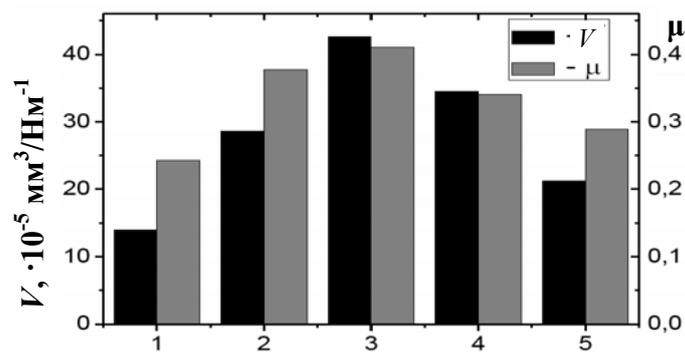
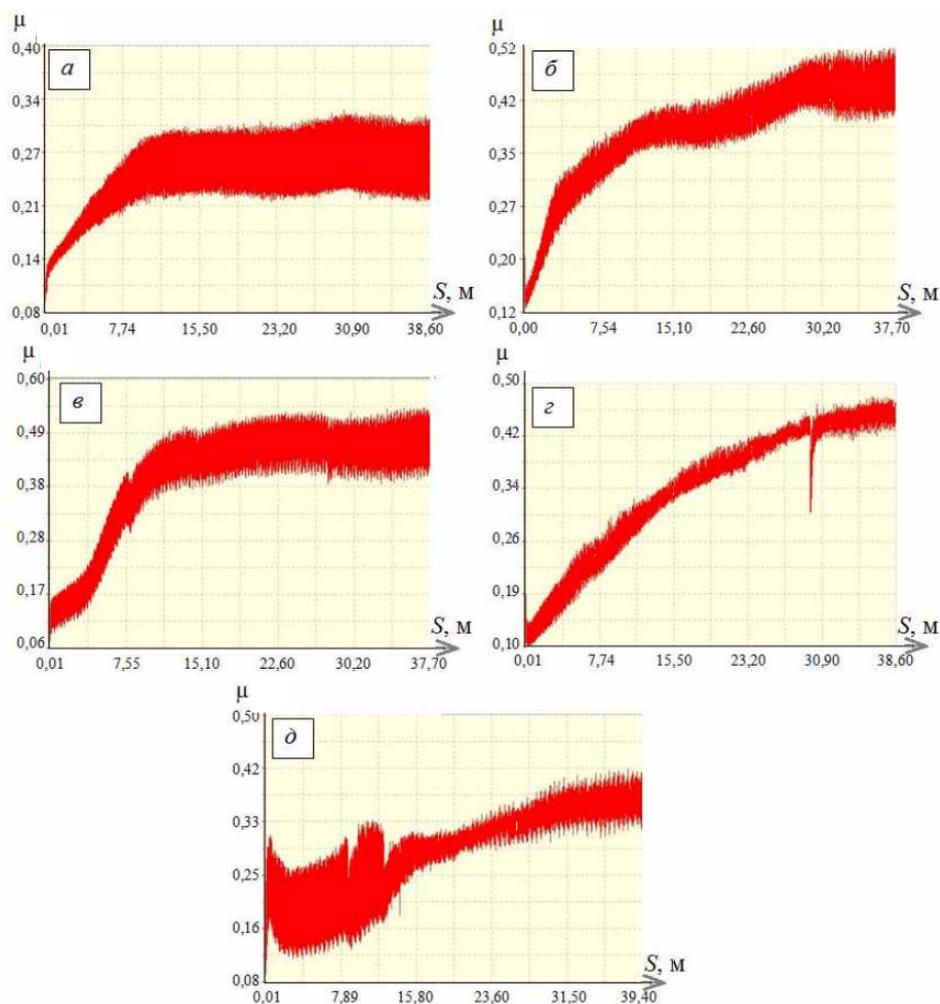


Рис. 5. Скорость износа V и коэффициент трения μ нанесенных электровзрывным методом на медь и облученных электронным пучком покрытий составов Cu—Mo (1), Cu—Mo—C (2), Cu—W (3), Cu—W—C (4), Cu—TiB₂ (5).



Для покрытий составов Mo—Cu и W—Cu характерна двухстадийность изменения коэффициента трения: первая стадия — почти линейный рост коэффициента трения с относительно небольшими флуктуациями $\delta(\mu)$ (для покрытия Mo—Cu — $\delta(\mu) = 0,015$; для W—Cu — $\delta(\mu) = 0,07$), нарастающими по мере приближения ко второй стадии. Вторая стадия характеризуется установившимся режимом для коэффициента трения μ_{\max} и максимальными значениями его флуктуации $\delta(\mu)$ (табл. 2).

Для покрытий составов Cu—Mo—C и Cu—W—C коэффициент трения с ростом времени испытаний увеличивается, изменяясь с учетом флуктуаций в пределах 0,126—0,499 (Cu—Mo—C) и 0,102—0,48 (Cu—W—C), и достигает максимальной величины к завершению испытаний (средние значения коэффициента трения указаны в табл. 2). Величина флуктуаций коэффициента трения $\delta(\mu)$ для покрытия Cu—Mo—C возрастает с увеличением времени испытания в пределах 0,023—0,095, для покрытия Cu—W—C — в пределах 0,037—0,054.

Эволюция коэффициента трения покрытия состава Cu—TiB₂ отличается от рассмотренных покрытий (рис. 6, д). Начальная стадия испытаний характеризуется высоким уровнем флуктуаций коэффициента трения ($\delta(\mu) \sim 0,16$).

Т а б л и ц а 2. Результаты трибологических испытаний покрытий

Покрытие	$\mu_{\text{ср}}$	μ_{min}	μ_{max}	δ_{μ}
Cu—Mo	0,243	0,04	0,323	0,084
Cu—Mo—C	0,377	0,126	0,499	0,023—0,095
Cu—W	0,411	0,077	0,544	0,12
Cu—W—C	0,341	0,102	0,48	0,037—0,054
Cu—TiB ₂	0,289	0,094	0,415	0,05—0,11

Далее фиксируется стадия с относительно низким уровнем флуктуаций ($\delta(\mu) \sim 0,05$), увеличивающимся к завершению испытаний до $\sim 0,11$. При этом коэффициент трения изменяется с учетом флуктуаций в пределах 0,094—0,415 и достигает максимального значения к завершению испытаний (среднее значение коэффициента трения — 0,289) (табл. 2).

Испытания на электроэрозионную стойкость по режиму АС-3 композиционных покрытий всех систем показали, что полученные в работе покрытия удовлетворяют ГОСТу на испытания электромагнитных пускателей на коммутационную износостойкость. В условиях искровой эрозии покрытия всех систем демонстрируют увеличение электроэрозионной стойкости в 10 раз по сравнению с электротехнической медью М00.

Результаты работы используются в производственной деятельности ОАО "ВЕСТ 2002" для восстановления и упрочнения электрических коммутирующих контактов силовых контроллеров КС-304, КС-305 и в производстве ООО "Ремкомплект" для упрочнения контактов пускателей марок ПВИ и ПВ.

Выводы

Выполнены электронно-микроскопические исследования покрытий, сформированных электровзрывным методом на образцах меди и облученных высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Выявлено формирование многофазной высокодефектной структуры в поверхностном слое покрытия. Установлено, что в покрытиях составов Mo—Cu и W—Cu вторыми фазами являются наноразмерные частицы молибдена и вольфрама. В покрытиях составов Mo—C—Cu, W—C—Cu и TiB₂—Cu формируются частицы вторых фаз — карбидов Mo₂C и WC, бориды титана Ti₂B₅. Проведены трибологические испытания и установлено, что по величине среднего коэффициента трения сформированные покрытия можно расположить в следующей последовательности: Mo—Cu (0,243), TiB₂—Cu (0,289), W—C—Cu (0,341), Mo—C—Cu (0,377), W—Cu (0,411); по возрастанию скорости изнашивания ($\cdot 10^{-5}$, мм³/Нм): Mo—Cu (14), TiB₂—Cu (21,2), Mo—C—Cu (28,6), W—C—Cu (34,5), W—Cu (42,6).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м и госзадания Минобрнауки № 2708ГЗ и задания № 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

1. Романов Д. А. Электровзрывное напыление электроэрозионноустойчивых покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионно стойких покрытий методом электровзрывного напыления / Д. А. Романов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. — 170 p.

2. *Budovskikh E. A.* The formation mechanism providing high-adhesion properties of an electric-explosive coating on a metal basis / E. A. Budovskikh, V. E. Gromov, D. A. Romanov // *Doklady Physics*. — 2013. — **58**, No. 3. — P. 82—84.
3. *Romanov D. A.* Surface Relief and Structure of Electroexplosive Composite Surface Layers of the Molybdenum–Copper System / D. A. Romanov, E. A. Budovskikh, V. E. Gromov // *J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2011. — **5**, No. 6. — P. 1112—1117.
4. *Romanov D. A.* Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system / [D. A. Romanov, E. A. Budovskikh, Y. D. Zhmakin, V. E. Gromov] // *Steel in Translation*. — 2011. — **41**, No. 6. — P. 464—468.
5. *Vashchuk E. S.* Electroexplosive boron-copper plating and subsequent electron-beam treatment of steel 45 / [E. S. Vashchuk, D. A. Romanov, E. A. Budovskikh, Y. F. Ivanov] // *Ibid.* — 2011. — **41**, No. 6. — P. 469—474.
6. *Пат. 2478732 РФ.* Композиционный электрически взрывае́мый проводник для электровзрывного напыления покрытий или электровзрывного легирования поверхности металлов и сплавов / Д. А. Романов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов. — Оpubл. 10.04.2013, Бюл. № 10.
7. *Иванов Ю. Ф.* Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения / Ю. Ф. Иванов, Н. Н. Коваль // *Структура и свойства перспективных металлических материалов* / Под общ. ред. А. И. Потекаева. — Томск : Изд-во НТЛ, 2007. — С. 345—382.

Формування електровибухових зносо- та електроерозійно стійких покриттів з використанням електронно-пучкової обробки

Д. А. Романов, О. В. Олесюк, Е. А. Будовских, В. Е. Громов

Досліджено вплив обробки високоінтенсивним електронним пучком поверхонь покриттів з композицій на основі міді, нанесених електронпідричним напыленням. Вивчено їх склад, структура і трибологічні властивості в парі з контртілом з твердого сплаву ВК8. Встановлено, що найкращими властивостями володіють модифіковані покриття складу Мо—Сu. Експлуатаційні характеристики контактів з міді з модифікованими покриттями всіх досліджених складів на порядок вище, ніж у серійних контактів без покриття.

Ключові слова: *електронпідривне напылення, електронно-пучкова обробка, структура, зносостійкість, електроерозійна стійкість.*

Formation electroexplosion wear and resistance to electrical erosion coatings using electron-beam treatment

D. A. Romanov, O. V. Olesyuk, E. A. Budovskikh, V. E. Gromov

The influence of processing high-intensity electron beam surface coating compositions on the basis of copper deposited electroexplosion spraying. Studied composition, structure and tribological properties paired with counterbody carbide VK8. Found that the best properties are modified coating composition of Mo—Cu. Operational characteristics of the copper contacts with the modified coatings of all compositions studied is much higher than that of serial contacts uncoated.

Keywords: *electroexplosive spraying, electron beam processing, structure, durability, resistance to electrical erosion.*