

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Олесюк О.В., Коновалов С.В., Романов Д.А.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Россия (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), konovalov@physics.sibsiu.ru

Проведено исследование влияния электронно-пучковой обработки электровзрывных электроэрозионно-стойких покрытий на их трибологические свойства (износостойкость и коэффициент трения). Покрытия систем Мо-Сu, Мо-С-Сu, W-Сu, W-С-Сu и TiB₂-Сu были сформированы на медной основе методами электровзрывного напыления и электронно-пучковой обработки. Установлено, что максимальная скорость износа выявлена у покрытия системы W-Сu, минимальная – у покрытия системы Мо-Сu. Увеличение скорости износа коррелирует с ростом средней величины коэффициента трения: чем выше коэффициент трения, тем интенсивнее износ материала. Показано, что электровзрывные покрытия после электронно-пучковой обработки показывают большую электроэрозионную стойкость при искровой эрозии в сопоставлении с медью марки М00, применяемой для изготовления электрических контактов. Большую электроэрозионную стойкость при искровой эрозии имеет композитное покрытие системы TiB₂-Сu, что связано с тем, что при напылении этого покрытия применяется TiB₂. Показано, что все исследованные покрытия демонстрируют повышение электроэрозионной стойкости при искровой эрозии до ~ 10 раз. Работа выполнена по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Ключевые слова: покрытия, медь, электровзрывное напыление, электронно-пучковая обработка, трибологические свойства.

EFFECT OF ELECTRON-BEAM TREATMENT ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ELECTRIC EXPLOSION EROSIONPROOF COATINGS

Olesyuk O.V., Konovalov S.V., Romanov D.A.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia (654007, Novokuznetsk, Kirova street, 42), konovalov@physics.sibsiu.ru

The study of influence of the electron beam treatment of electric explosion and erosionproof coatings on their tribological properties (wear resistance and coefficient of friction) has been carried out. Coating system Mo-Cu, Mo-C-Cu, W-Cu, WC-Cu and TiB₂-Cu were formed on the copper-based methods of electroexplosive spraying and electron beam processing. It was established that the maximum rate of wear was found in the coating system W-Cu, and the minimum one – in the coating of Mo-Cu. The increasing the wear rate correlates with an increase in the average value of the coefficient of friction: the higher the coefficient of friction, the more intensive material wear. It is shown that the coatings after electric explosion after electric beam treatment exhibit a greater electric erosion resistance in spark erosion when compared with copper grades M00, used for the manufacture of electrical contacts. The composite coating system TiB₂-Cu, has a greater electric erosion resistance in spark erosion which is due to the fact that during the straying the coating TiB₂ is applied. It was demonstrated that all the investigated coatings exhibit an increase in EDM spark erosion resistance by the factor of 10. The work is done on a specialty 01.04.07 - Condensed Matter Physics.

Keywords: coating, copper, electroexplosive spraying, electron beam processing, tribological properties.

Введение

Перспективными методами внешних энергетических воздействий, оказывающими существенное влияние на структуру, фазовый состав, физические и механические свойства металлов и сплавов являются электровзрывное напыление (ЭВН) покрытий и электронно-пучковая обработка (ЭПО). Первый из них позволяет получать высококачественные покрытия, обладающие адгезией с подложкой и высокими функциональными свойствами. Одной из областей применения этого метода является модификация поверхностных слоев материа-

лов электротехнического назначения. Метод позволяет наносить покрытия из продуктов взрыва проводников, а также осуществлять формирование композиционных покрытий [2; 4]. Второй метод заключается в обработке поверхности низкоэнергетическими импульсными высокоэнергетическими электронными пучками, обеспечивающими регулирующую в широком диапазоне плотность энергии на поверхности облучаемого материала. Сверхвысокие скорости нагрева до температур плавления и последующего охлаждения тонкого приповерхностного слоя материала, формирование предельных градиентов температуры, обеспечивающих охлаждение приповерхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью $10^4 \dots 10^9$ К/с позволяет существенно улучшить характеристики поверхности материала после ЭВН [5; 8].

В нашей работе [6] методами ЭВН и ЭПО сформированы покрытия систем Mo-Cu, Mo-C-Cu, W-Cu, W-C-Cu и TiB₂-Cu (Cu – подложка) и методами современного физического материаловедения выявлено формирование многофазной высокодефектной структуры в поверхностном слое покрытия. Установлено, что в покрытиях систем Mo – Cu и W – Cu вторыми фазами являются наноразмерные частицы молибдена и вольфрама. В покрытиях систем Mo – C – Cu, W – C – Cu и TiB₂ – Cu выявлено формирование частиц вторых фаз – карбидов Mo₂C и WC, бориды титана Ti₂B₅.

Целью настоящей работы, являющейся продолжением [6], является исследование влияния импульсной электронно-пучковой обработки на свойства электровзрывных электроэрозийноустойчивых покрытий систем Mo – Cu, W – Cu, Mo – C – Cu, W – C – Cu и TiB₂ – Cu.

Материал и методы исследования

Как и в [6], ЭВН (установка ЭВУ 60/10М СибГИУ) покрытия наносили на медные электрические контакты командоконтроллера ККТ 61 (площадь контактов 1,5 см²). ЭВН проводили с использованием композиционного электрически взрываемого проводника для нанесения покрытий, который представлял собой двуслойную медную фольгу с заключенной в ней навеской порошков Mo или Mo и C (графит), W или W и C (графит), TiB₂. Масса порошков Mo, W и TiB₂ составляла 0,272 г каждого, графита – 0,027 г, меди – 0,238 г.

Модифицирование поверхности электровзрывных покрытий осуществляли ЭПО (установка «СОЛО» ИСЭ СО РАН), переплавляющей поверхностный слой толщиной до 50 мкм с дальнейшим высокоскоростным охлаждением за счет отвода тепла в объем материала. Режимы электронно-пучковой обработки покрытий не отличались от представленных в [6].

Трибологические свойства (износостойкость и коэффициент трения) покрытий изучали в геометрии диск-штифт с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре и влажности. В качестве контртела использовался шарик из твердого сплава ВК-8 диаметром 3 мм, диаметр трека равнялся 6 мм, скорость вращения – 2,5 см/с, нагрузка – 3 Н,

дистанция до остановки – 38,6 м, количество оборотов – 3000. Объем износа материала покрытия определялся после проведения профилометрии образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Station (Stil, Франция). Испытания на электроэрозионную стойкость покрытий в условиях дуговой эрозии проводили при переменном токе и индуктивной нагрузке в соответствии с требованиями режима испытаний АС-3 на коммутационную износостойкость при работе в трехфазной цепи со значением низкого напряжения 400/230 В, частотой 50 Гц для током до 320 А и $\cos\varphi = 0,35$ и числе коммутационных циклов 6000.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений скорости износа V и средней величины коэффициента трения μ покрытий представлены на рис. 1. Видно, что обе характеристики покрытия существенным образом зависят от его элементного состава. Максимальная скорость износа выявлена у покрытия системы W-Cu, минимальная – у покрытия системы Mo-Cu. Увеличение скорости износа коррелирует с ростом средней величины коэффициента трения: чем выше коэффициент трения, тем интенсивнее износ материала.

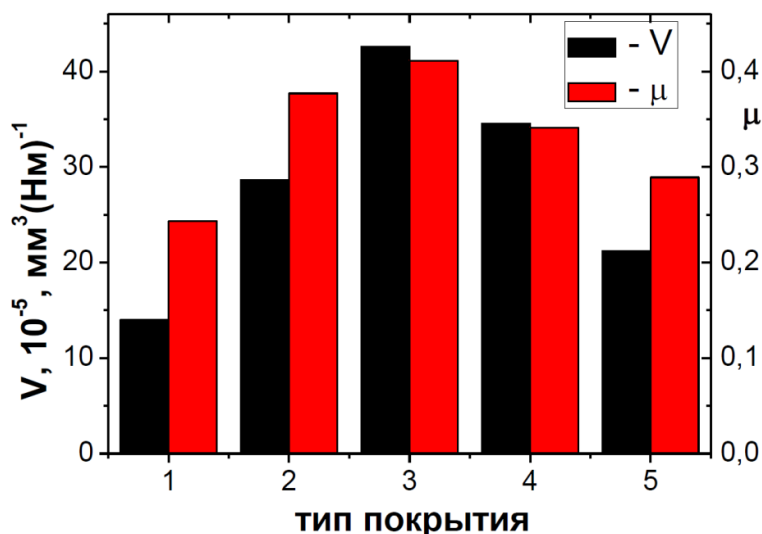


Рисунок 1 – Скорость износа V и коэффициент трения μ нанесенных электровзрывным методом на медь и облученных электронным пучком покрытий систем Mo-Cu (1), Mo-C-Cu (2), W-Cu (3), W-C-Cu (4), TiB₂-Cu (5)

На рис. 2 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. 1 – численные характеристики коэффициента трения. Анализируя представленные на рис. 2 результаты, можно отметить, что изменение коэффициента трения покрытий в процессе испытания зависит от его элементного состава.

А именно, для покрытий систем Mo-Cu (рис. 2а) и W-Cu (рис. 2в) характерна двухстадийность изменения коэффициента трения: первая стадия почти линейного роста 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 поведения коэффициента трения, значения которого (μ_{\max}) указаны в табл. 1, и максимальными значениями его флуктуации $\delta(\mu)$.

Таблица 1 – Результаты трибологических испытаний покрытий

Покрытие системы	μ (средн.)	μ (min.)	μ (max.)	$\delta(\mu)$
Mo-Cu	0,243	0,040	0,323	0,084
Mo-C-Cu	0,377	0,126	0,499	0,023
W-Cu	0,411	0,077	0,544	0,120
W-C-Cu	0,341	0,102	0,480	0,054
TiB ₂ -Cu	0,289	0,094	0,415	0,110

Для покрытий систем Mo-C-Cu (рис. 2б) и W-C-Cu (рис. 2г) коэффициент трения с ростом времени испытаний увеличивается, изменяясь с учетом флуктуаций в пределах 0,126...0,499 (покрытие системы Mo-C-Cu) и 0,102...0,48 (покрытие системы W-C-Cu), достигая максимального значения к концу испытаний (средние значения коэффициента трения указаны в табл. 1). Величина флуктуаций коэффициента трения $\delta(\mu)$ для покрытия Mo-C-Cu увеличивается с увеличением времени испытания в пределах 0,023...0,095, для покрытия W-C-Cu в пределах 0,037...0,054. Изменение коэффициента трения покрытия системы TiB₂-Cu отличается от рассмотренных выше покрытий (рис. 2д). Начальная стадия испытаний характеризуется высоким уровнем флуктуаций коэффициента трения ($\delta(\mu) \sim 0,16$), далее фиксируется стадия с относительно низким уровнем флуктуаций $\delta(\mu) \sim 0,05$, увеличивающимся к концу испытаний до $\delta(\mu) \sim 0,11$. При этом коэффициент трения изменяется с учетом флуктуаций в пределах 0,094...0,415 и достигает максимального значения к концу испытаний (среднее значения коэффициента трения 0,289) (табл. 1).

Рассмотрим результаты испытаний электровзрывных покрытий систем Mo-Cu, W-Cu, Mo-C-Cu, W-C-Cu и TiB₂-Cu, обработанных высокоинтенсивным электронным пучком на электроэрозионную стойкость в условиях действия электрической дуги.

После ЭПО структура электровзрывных покрытий систем Mo-Cu, W-Cu, Mo-C-Cu, W-C-Cu и TiB₂-Cu представляет собой медную матрицу с глобулярными включениями молибдена или вольфрама, карбидов молибдена или вольфрама или диборида титана. До испытаний на электроэрозионную стойкость рельеф поверхности покрытий независимо от элементного состава и режима облучения представляет собой поверхность, обладающую зеркальным

блеском. После завершения испытаний на электроэрозионную стойкость в условиях действия электрической дуги поверхность покрытий всех систем изменяется. На ней наблюдается формирование кратеров, возникающих в результате протекания процессов эрозии.

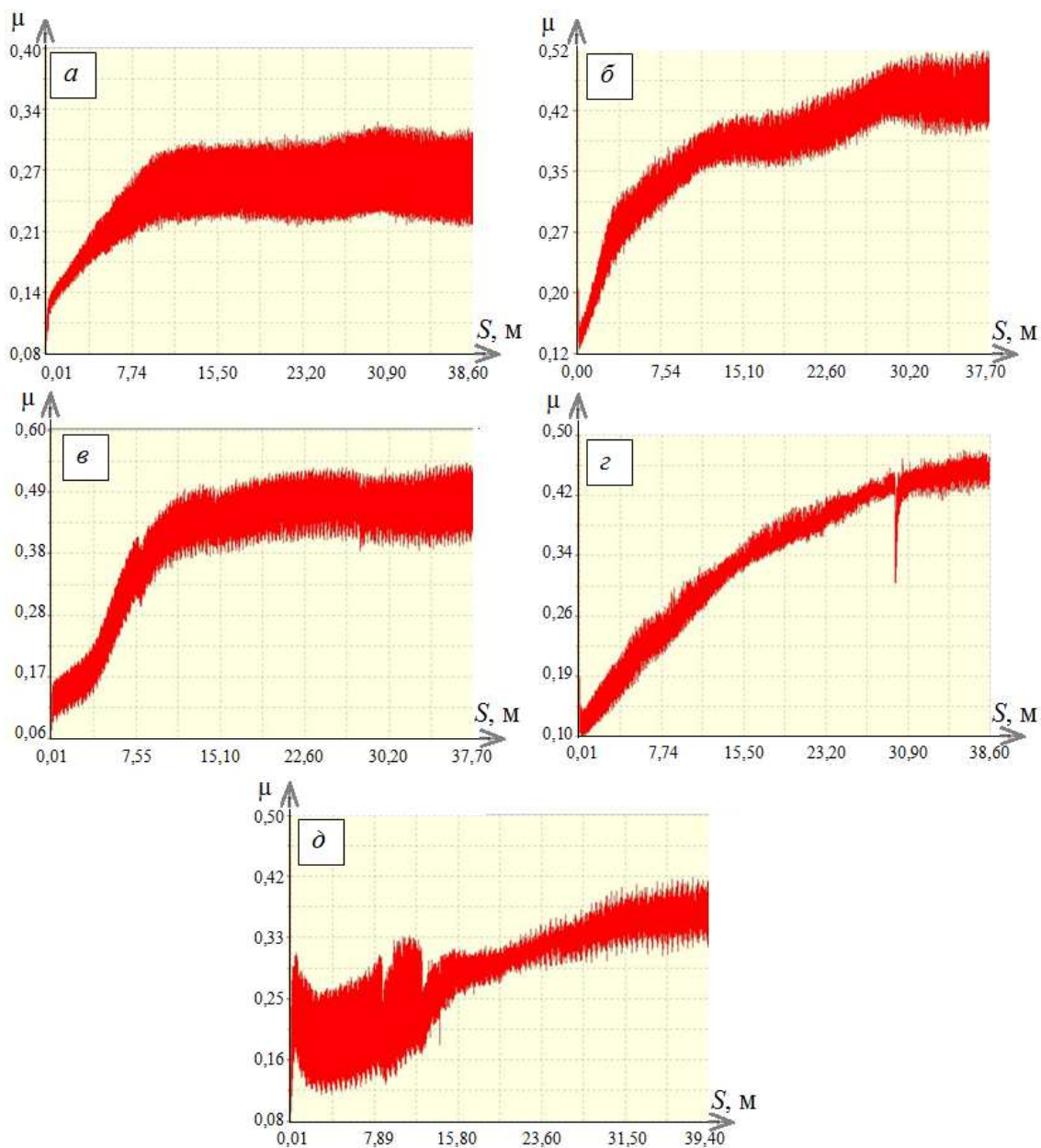


Рисунок 2 – Изменение коэффициента трения μ в зависимости от пути трека износа S при испытаниях покрытий систем Mo-Cu (а), Mo-C-Cu (б), W-Cu (в), W-C-Cu (г), TiB₂-Cu (д), обработанных импульсным электронным пучком. Контртело: твердый сплав BK8

Таким образом, трансформация поверхностных структур покрытий может быть объяснена, исходя из тех соображений, что в процессе циклов включения/отключения имеет место испарение меди, повышение в поверхностном слое покрытия концентрации тугоплавкого компонента, увеличение их температуры вследствие понижения электропроводности и, как результат, повышение скорости разрушения по отношению к ее значениям в начале испытаний [3]. Электрическая дуга при размыкании контактов несколько миллисекунд остается в

стационарном состоянии, и из-за этого происходит эрозия. При этом разряд дуги представляется как короткая дуга между электродами, горящая в парах контактных материалов. При возникновении прерывистых энергетических потоков на поверхности опорного дугового пятна появляются микропузыри. Повышение внутреннего давления в микропузырях ведет к их взрыву, вытеканию плазменных микроструй, способных проводить ток, и формированию кратеров, которое сопровождается разбрызгиванием жидких металлических капель и частиц в твердом состоянии. На опорном дуговом пятне совместно действует несколько кратеров. Значения тока в плазменных микроструях достигает величины порядка ~ 100 А, плотность тока – ~ 100 А/см², а величина давления в плазменной микроструе – $\sim 10^7$ Па.

В процессе испытаний сопротивление покрытий всех систем находится в интервале 4,2...14 мкОм (рис. 3). При этом в интервале от 0 до 4000 циклов включения/выключения значение сопротивления покрытий изменяется в пределах 4,2...8 мкОм. При 5000 циклов сопротивление возрастает до 11...14 мкОм и снижается до 8...12 мкОм к 6000 циклам включения/выключения. Увеличение сопротивления к концу испытаний (при $N = 5000...6000$) можно объяснить исходя из того, что из-за изменения рельефа поверхности происходит уменьшение площади соприкосновения контактов.

По результатам испытаний композиционных покрытий всех систем на электроэрозионную стойкость по режиму АС-3 можно констатировать, что полученные в работе покрытия удовлетворяют ГОСТ 2933–83 по испытаниям электромагнитных пускателей на коммутационную износостойкость.

Рассмотрим результаты испытаний электровзрывных покрытий систем Mo-Cu, W-Cu, Mo-C-Cu, W-C-Cu и TiB₂-Cu после ЭПО на электроэрозионную стойкость в условиях действия искровой эрозии. Электровзрывные покрытия после ЭПО показывают большую электроэрозионную стойкость при искровой эрозии в сопоставлении с медью марки М00, применяемой для изготовления электрических контактов (табл. 2). Очевидно, что большую электроэрозионную стойкость при искровой эрозии имеет композитное покрытие системы TiB₂-Cu. Это обусловлено тем, что при ЭВН этого покрытия применяется TiB₂, имеющий лучшие показатели в сопоставлении с прочими боридами титана [1]. В общем можно сказать, что все покрытия демонстрируют повышение электроэрозионной стойкости при искровой эрозии до значений ~ 10 раз. Специфика деградации покрытий аналогична таковой в случае испытаний на электроэрозионную стойкость в условиях действия электрической дуги. Сравнивая данные испытаний со случаем ЭВН этих покрытий без ЭПО [7] можно отметить, что электроэрозионная стойкость в условиях искрового разряда увеличивается \sim на 10%.

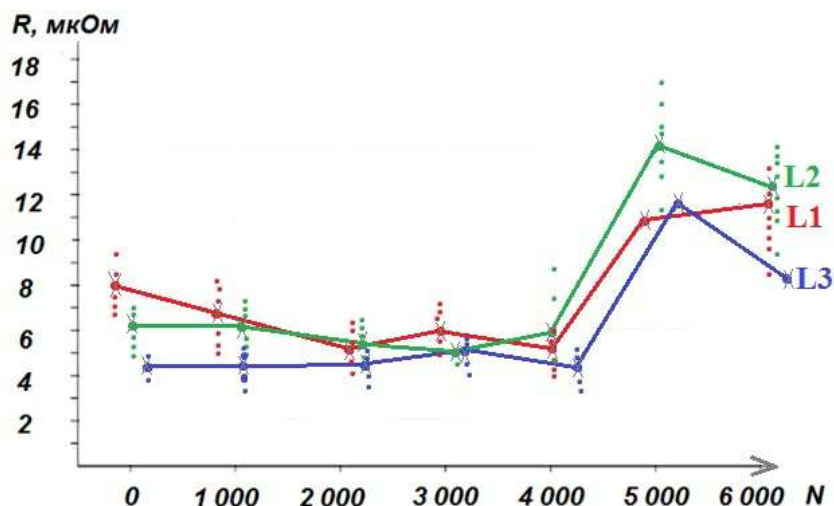


Рисунок 3 – Характерная зависимость контактного сопротивления (R) от числа циклов включения/отключения (N) при испытаниях покрытий на электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии

Таблица 2 – Относительное изменение электроэрозионной стойкости электровзрывных покрытий после ЭПО в условиях искровой эрозии

Система	W-Cu	Mo-Cu	TiB ₂ -Cu	W-C-Cu	Mo-C-Cu
m/m_0	9,6	10,0	10,4	10,0	9,9

Примечание: m_0 – потеря массы меди, принятая за эталон при 10^4 циклов испытаний, m – потеря массы покрытия

Выводы

В результате проведения исследований по установлению влияния электровзрывного напыления и импульсной электронно-пучковой обработки на свойства электроэрозионностойких покрытий систем Mo – C – Cu, W – C – Cu и TiB₂ – Cu установлено, что чем выше коэффициент трения, тем интенсивнее происходит изнашивание материала. По величине среднего коэффициента трения покрытия располагаются в ряд 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: Mo-Cu ($14 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм) – TiB₂-Cu ($21,2 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм) – Mo-C-Cu ($28,6 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм) – W-C-Cu ($34,5 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм) – W-Cu ($42,6 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм). Показано, что электроэрозионная стойкость при искровом разряде повышается в ~ 10 раз в сопоставлении с медью электротехнической марки М00.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., доценту Ю.Ф. Иванову, д.т.н., доценту Е.А. Будовских и д.ф.-м.н., профессору В.Е. Громову за помощь в проведении ЭВН и ЭПО.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м и госзадания Минобрнауки № 270ГЗ.

Список литературы

- 1 Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов : справочник. – М. : Металлургия, 1987. – 208 с.
- 2 Будовских Е.А., Громов В.Е., Романов Д.А. Механизм формирования высокой адгезии электровзрывных покрытий с основой металла // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 449. - № 1. – С. 25.
- 3 Мещеряков В.П. Электрическая дуга большой мощности в выключателях. – Ч. II. – Ульяновск : ОАО «Контактор», 2006. – 429 с.
- 4 Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий, полученных методом электровзрывного напыления // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 1. – С. 36-43.
- 5 Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя, формирующееся в стали 20Х13 в результате облучения высокоинтенсивным электронным пучком // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 6. – С. 111-116.
- 6 Структура покрытий, сформированных методом электровзрывного напыления, после электронно-пучковой обработки // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 4. – С. 16-19.
- 7 Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
- 8 Формирование градиентной структуры поверхностного слоя при электронно-лучевой обработке аустенитной стали // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 1. – С. 61-65.

Рецензенты:

Иванов Ф.И., д.х.н., профессор, заместитель директора по науке Новокузнецкого филиала-института ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный университет», г. Новокузнецк.

Баранникова С.А., д.ф.-м.н., доцент, г.н.с. ФБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», г. Томск.