

ЛИТЕРАТУРА

1. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационно-го синтеза. Получение, свойства, применение. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.
2. Пат. 2004491 (РФ). Способ очистки детонационного алмаза / А. С. Чиганов, Г. А. Чиганова, Ю. В. Тушко, А. М. Ставер. 1993.
3. Чиганова Г. А., Чиганов А. С. // Журн. прикладной химии. 1998. Т. 71, № 11. С. 1832.
4. Мордвинова Л. Е., Чиганова Г. А., Чиганов А. С. // Сб. тр. 9-й Междунар. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 22–23 апр. 2010 г.). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. Т. 4. С. 443.
5. Химиченко А. А., Исаков В. П., Лямкин А. И. // Сб. науч. трудов VII Всерос. конф. «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем» (г. Москва, 22–24 нояб. 2005 г.). М.: МИФИ, 2006. С. 283.
6. Пат. 2367596 (РФ). Способ обработки наноалмазов / Г. А. Чиганова, Л. Е. Мордвинова, И. А. Якимов. 2009.
7. Ананьева Е. Ю., Рогожин В. В. // Тез. докл. III Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, 26–27 мая 2004 г.). Н. Новгород: НГТУ, 2004. С. 286.
8. Верецагин А. Л., Золотухина И. И., Брыляков П. М. и др. // Сверхтвердые материалы. 1991. № 1. С. 46.
9. Кузнецова Т. А. // Сб. докл. VII Междунар. сем. «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (Респ. Беларусь, г. Минск, 1–3 нояб. 2006 г.). Минск: Институт тепло- и массообмена НАНБ, 2006. С. 246.
10. Ковенский И. М., Поветкин В. В. Остаточные напряжения в гальванических покрытиях. Тюмень: Фил. изд-ва «Тюменская правда», 1991.

УДК 621.785:669.1.08.29

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННО-СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ

© 2014 г. **Д. А. Романов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

Статья поступила в редакцию 15.10.12 г., доработана 10.12.13 г., подписана в печать 16.12.13 г.

Д. А. Романов – канд. техн. наук, доцент кафедры физики СибГИУ (654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42).

Тел.: (3843) 78-43-91. E-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru.

Е. А. Будовских – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: budovskih_ea@physics.sibsiu.ru.

В. Е. Громов – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. той же кафедрой.

Описан метод электровзрывного напыления электроэрозионно-стойких композиционных покрытий систем W–Cu, Mo–Cu, Ti–B–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu. С помощью оптической интерферометрии, сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа изучены рельеф их поверхности, особенности структуры и фазового состава. Установлено, что покрытия имеют когезивно-адгезивную связь с материалом контактной поверхности. Определены их параметры шероховатости. Показано, что толщина покрытий может регулироваться в широких пределах (до 2 мм) в зависимости от условий эксплуатации конкретной номенклатуры упрочняемых деталей, износостойкость увеличивается до 2 раз, а электроэрозионная стойкость в условиях искровой эрозии – до 10 раз по сравнению с электротехнической медью M00.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электроэрозионно-стойкие покрытия, шероховатость, микроструктура, фазовый состав.

There was described method of electroexplosive evaporation of electro erosion resistance composite coatings of systems W–Cu, Mo–Cu, Ti–B–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu. With the use of optical interferometry, scanning electron microscopy and X-ray microanalysis were studied relief of its surface and phase composition. There was defined that coatings have cohesive-adhesive bond with material of contact surface. There were determined parameters of undulation. Coating thickness could be regulating in wide range (up 2 mm) depending on service conditions of concrete nomenclature of hardenable articles. Abrasion hardness of coatings is increasing by 2 times, and electro erosion resistance in the conditions of spark erosion up to 10 times in comparison with electrical copper M00.

Key words: electroexplosive evaporation, electro erosion resistance coatings, undulation, microstructure, phase composition.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационно-го синтеза. Получение, свойства, применение. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.
2. Пат. 2004491 (РФ). Способ очистки детонационного алмаза / А. С. Чиганов, Г. А. Чиганова, Ю. В. Тушко, А. М. Ставер. 1993.
3. Чиганова Г. А., Чиганов А. С. // Журн. прикладной химии. 1998. Т. 71, № 11. С. 1832.
4. Мордвинова Л. Е., Чиганова Г. А., Чиганов А. С. // Сб. тр. 9-й Междунар. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 22–23 апр. 2010 г.). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. Т. 4. С. 443.
5. Химиченко А. А., Исаков В. П., Лямкин А. И. // Сб. науч. трудов VII Всерос. конф. «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем» (г. Москва, 22–24 нояб. 2005 г.). М.: МИФИ, 2006. С. 283.
6. Пат. 2367596 (РФ). Способ обработки наноалмазов / Г. А. Чиганова, Л. Е. Мордвинова, И. А. Якимов. 2009.
7. Ананьева Е. Ю., Рогожин В. В. // Тез. докл. III Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, 26–27 мая 2004 г.). Н. Новгород: НГТУ, 2004. С. 286.
8. Верецагин А. Л., Золотухина И. И., Брыляков П. М. и др. // Сверхтвердые материалы. 1991. № 1. С. 46.
9. Кузнецова Т. А. // Сб. докл. VII Междунар. сем. «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (Респ. Беларусь, г. Минск, 1–3 нояб. 2006 г.). Минск: Институт тепло- и массообмена НАНБ, 2006. С. 246.
10. Ковенский И. М., Поветкин В. В. Остаточные напряжения в гальванических покрытиях. Тюмень: Фил. изд-ва «Тюменская правда», 1991.

УДК 621.785:669.1.08.29

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННО-СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ

© 2014 г. **Д. А. Романов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

Статья поступила в редакцию 15.10.12 г., доработана 10.12.13 г., подписана в печать 16.12.13 г.

Д. А. Романов – канд. техн. наук, доцент кафедры физики СибГИУ (654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42).
Тел.: (3843) 78-43-91. E-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru.

Е. А. Будовских – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: budovskih_ea@physics.sibsiu.ru.

В. Е. Громов – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. той же кафедрой.

Описан метод электровзрывного напыления электроэрозионно-стойких композиционных покрытий систем W–Cu, Mo–Cu, Ti–B–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu. С помощью оптической интерферометрии, сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа изучены рельеф их поверхности, особенности структуры и фазового состава. Установлено, что покрытия имеют когезивно-адгезионную связь с материалом контактной поверхности. Определены их параметры шероховатости. Показано, что толщина покрытий может регулироваться в широких пределах (до 2 мм) в зависимости от условий эксплуатации конкретной номенклатуры упрочняемых деталей, износостойкость увеличивается до 2 раз, а электроэрозионная стойкость в условиях искровой эрозии – до 10 раз по сравнению с электротехнической медью M00.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электроэрозионно-стойкие покрытия, шероховатость, микроструктура, фазовый состав.

There was described method of electroexplosive evaporation of electro erosion resistance composite coatings of systems W–Cu, Mo–Cu, Ti–B–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu. With the use of optical interferometry, scanning electron microscopy and X-ray microanalysis were studied relief of its surface and phase composition. There was defined that coatings have cohesive-adhesive bond with material of contact surface. There were determined parameters of undulation. Coating thickness could be regulating in wide range (up 2 mm) depending on service conditions of concrete nomenclature of hardenable articles. Abrasion hardness of coatings is increasing by 2 times, and electro erosion resistance in the conditions of spark erosion up to 10 times in comparison with electrical copper M00.

Key words: electroexplosive evaporation, electro erosion resistance coatings, undulation, microstructure, phase composition.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка поверхности плазменными струями используется для создания покрытий и модификации свойств материалов, что является одной из основных, наиболее важных проблем физического материаловедения [1]. Особенности структуры и свойств упрочняющих и защитных покрытий отражают специфику методов, используемых для их нанесения. В последние годы получили развитие импульсные технологии получения покрытий, которые позволяют формировать пленки, обладающие низкой пористостью и субмикроструктурной структурой, высокой адгезией с основой и другими достоинствами, которые недостижимы при использовании традиционных методов газотермического напыления.

Так, в работах [2, 3] получены покрытия из несмешивающихся компонентов системы W–Cu. Однако они имеют малую (5 мкм) толщину и нерегулируемый состав. Широкими технологическими возможностями обладает импульсный метод электровзрывного напыления (ЭВН) [4–6]. В частности, он позволяет получать покрытия системы W–Cu с толщиной единичных слоев до 250 мкм. Требуемое соотношение компонентов в нем достигается выбором массы взрывающего проводника (Cu) и порошковой навески (W), размещаемой на проводнике в области взрыва. Это обуславливает интерес к дальнейшему развитию данного способа.

В связи с этим целью настоящей работы являлось формирование методом ЭВН электроэрозионно-стойких покрытий на контактных поверхностях, прежде всего из несмешивающихся компонентов, изучение их структуры, фазового состава и свойств.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Напыление покрытий проводили с использованием электровзрывной установки ЭВУ 60/10М, которая описана в работах [7, 8]. Она включает емкостный накопитель энергии и импульсный плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы электродов с размещенным на них проводником, разрядной камеры, локализирующей 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 металлическую фольгу тока большой плотности при разряде на нее накопителя [8]. Из продуктов взрыва формируется сверхзвуковая многофазная плазменная струя, которая служит для напыления покрытий при времени импульса 100 мкс. Подробности методики получения покрытий методом ЭВН изложены в [4].

Покрытия наносили на изделия из электротехнической меди марки М00. Использовали медные, молибденовые и титановые фольги, а также порошки молибдена, вольфрама, диборида титана, графита и аморфного бора с размером частиц 0,1–1,0 мкм, которые размещались на фольгах и совместно с продуктами взрыва переносились на облучаемую поверхность. При этом формировались композиционные покрытия со слоистой или наполненной структурой [9].

Покрытия со слоистой структурой напылялись без оплавления поверхности основы и представляли собой чередующиеся слои молибдена и меди. Покрытия с наполненной структурой, когда в медной матрице располагаются включения порошков, напылялись в условиях оплавления поверхности облучения. При этом происходило смешивание материала основы с компонентами многофазной плазменной струи продуктов электрического взрыва фольги и частиц порошков. Фазовый состав покрытий определялся выбранными значениями масс взрываемых проводников и порошковых навесок.

Были получены электроэрозионно-стойкие покрытия, различающиеся по элементному и фазовому составам, в том числе состоящие из несмешивающихся компонентов (W–Cu, W–C–Cu, Mo–Cu, Mo–C–Cu и Ti–B–Cu [10–13]), основные особенности которых рассмотрены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На поверхности слоистых покрытий, сформированных электровзрывом фольг без порошковых навесок, наблюдаются сравнительно гладкие области неправильной формы, а при их наличии формируются зоны с развитым рельефом, образованные частицами порошков.

При формировании композиционных покрытий с наполненной структурой на их поверхности выделяются хаотически расположенные как сравнительно гладкие участки неправильной формы, так и рельефные, образованные частицами глобулярной формы с размерами в пределах от 0,5 до 20,0 мкм, суммарные площади которых составляют 25 и 75 % соответственно. Относительное содержание меди в областях с гладким рельефом выше, чем с развитым. На основании этого можно считать, что первые образованы преимущественно конденсированными частицами продуктов взрыва медной фольги, а последние – частицами порошков для ЭВН.

По результатам оценки характеристик топографии поверхности обоих видов покрытий [14] параметры шероховатости составили $R_a = 2,0 \div 2,5$ мкм, $R_{max} = 10,1 \div 33,3$ мкм и $S_m = 40,1 \div 50,2$ мкм. Наибольшие значения R_a имеют покрытия системы Мо–Cu с наполненной нанокристаллической структурой, что обусловлено режимными параметрами напыления.

При получении слоистых покрытий с использованием фольг молибдена и меди (рис. 1, а, б) оказалось, что толщина единичных слоев пропорциональна массе фольги и достигала 0,14 мм, а при последовательном напылении нескольких слоев максимальная толщина сформированных

покрытий составляла 2 мм. На границах слоев Cu и Mo, а также молибдена с основой вследствие термосилового воздействия плазменной струи на облучаемую поверхность, нагреваемую до температуры плавления, формируется волнообразный рельеф, который за счет увеличения площади границы покрытия с основой повышает адгезию.

При увеличении поглощаемой плотности мощности (q) воздействия на поверхность происходит искажение границ раздела поверхностного слоя с основой и между его отдельными слоями, что влечет за собой разрушение слоистой структуры и формирование покрытий с наполненной структурой (рис. 1, в–д). В низкоинтенсивном режиме ЭВН (сначала поверхность меди обрабатывается плазменной струей, сформированной при электровзрыве молибденовой фольги, когда поглощаемая плотность мощности составляла 6,0 ГВт/м², а затем – повторно, электровзрывом медной фольги при $q = 7,6$ ГВт/м²) в молибденовой матрице по всей толщине покрытия наблюдались глобулярные включения меди размерами 30–200 нм (см. рис. 1, з), а некоторые из них достигали 1 мкм.

При ЭВН образцов в высокоинтенсивном режиме (когда при повторном электровзрыве медной фольги поглощаемая плотность мощности превышала 10 ГВт/м²) при обработке молибдено-

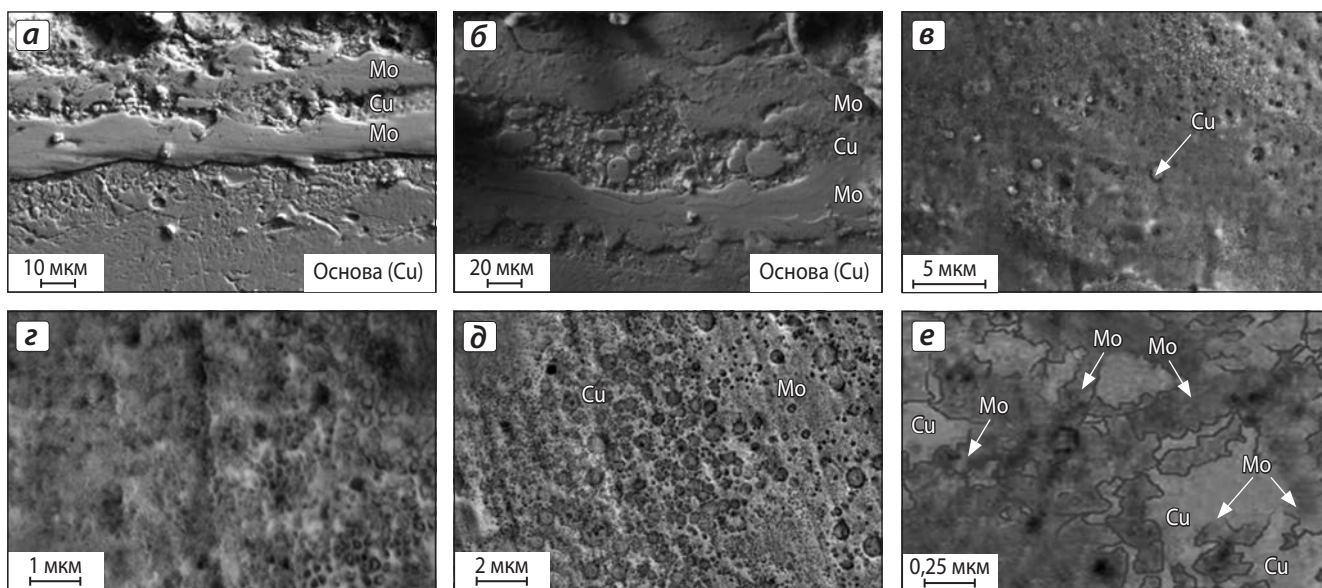


Рис. 1. Изображения структуры композиционных покрытий Мо–Cu со слоистой (а, б) и наполненной (в–д) структурами, сформированных с использованием фольг молибдена и меди (СЭМ, прямые шлифы)
 е – зона смешивания молибдена и меди на границе покрытия с основой

вого слоя продуктами взрыва медной фольги формируются слои с композиционной наполненной структурой на основе Mo и Cu, в которых размер медных включений составляет 2 мкм (см. рис. 1, д). В этом случае они не выкрашиваются из матрицы, что способствует улучшению электроэрозионной стойкости поверхностных слоев. На границе покрытий с основой образуется зона смешивания Mo и Cu, в которой наблюдаются изолированные включения молибдена субмикрометровых размеров в медной матрице (см. рис. 1, е).

При увеличении поглощаемой плотности мощности при обработке предварительно напыленного молибденового слоя продуктами взрыва медной фольги формируется структура, образованная глобулярными включениями молибдена размерами около 2 мкм в медной матрице (рис. 2, б). Встречаются также субмикрометровые включения Mo. Аналогичная картина наблюдается и для покрытий W-Cu (см. рис. 2, д). Глобулярная форма включений, по-видимому, обусловлена действием сил поверхностного натяжения.

При ЭВН покрытий со слоистой структурой с использованием медных фольг и порошков Mo или W (см. рис. 2, а, з) их граница с основой имеет особенности, аналогичные вышеописанным экспериментам с молибденовой фольгой. Но при этом имеет место проникновение отдельных ча-

стиц вольфрама и молибдена в основу на глубину до нескольких микрометров (см. рис. 2, в, е).

Возможный механизм данного процесса предложен в работе [15]. Он основан на представлении физической мезомеханики о возникновении в поверхностном слое при напылении атом-вакансионных конфигурационных возбуждений основы и распределении растягивающих и сжимающих напряжений и деформаций на границе «сильно-неравновесный слой – основа» в виде шахматной доски.

При использовании электроконтактных композиционных покрытий систем W-Cu, Mo-Cu, Ti-B-Cu и W-C-Cu износостойкость в режиме сухого трения скольжения без смазки по сравнению с таковой электротехнической меди марки М00 увеличивается в 1,7–2,2 раза. Электроэрозионная стойкость в условиях дуговой эрозии покрытий с наполненной структурой толщиной 25 мкм составляет около 10 000 циклов включений-выключений, и ее дополнительно можно повысить путем увеличения их толщины при повторном напылении единичных слоев. В ходе ускоренных испытаний на электроэрозионную стойкость в условиях искровой эрозии покрытия с композиционной наполненной структурой всех систем показывают ее увеличение примерно в 10 раз.

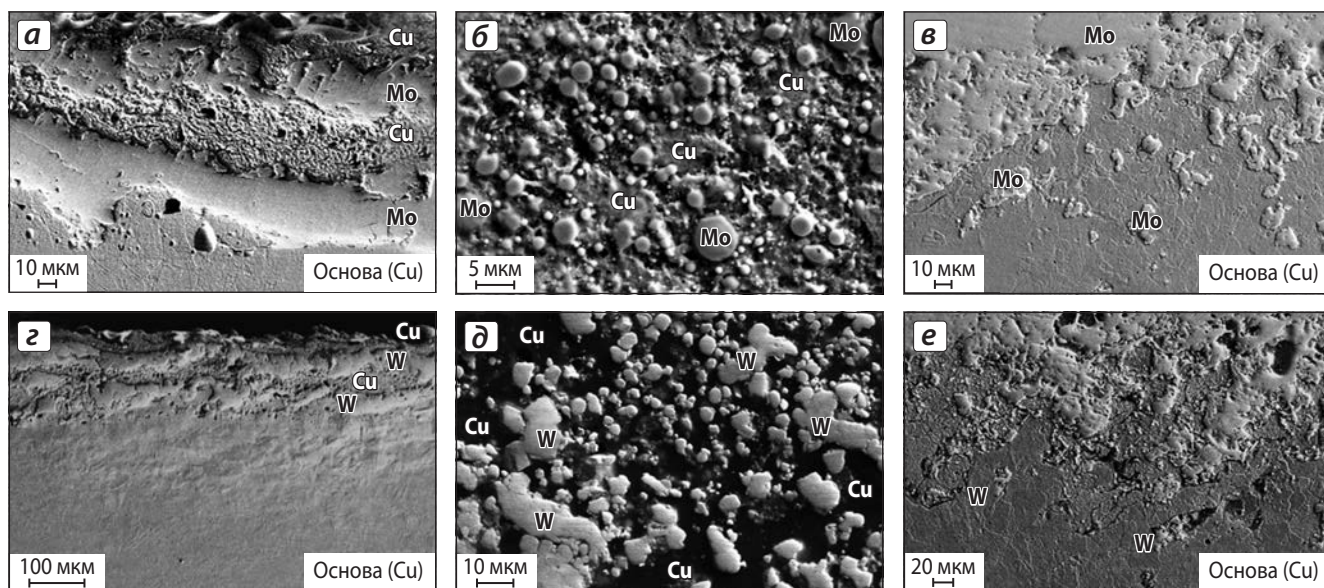


Рис. 2. Характерные изображения структуры покрытий систем Mo-Cu (а, б) и W-Cu (з, д) (СЭМ, прямые шлифы)

а, з – покрытия со слоистой структурой, б, д – с наполненной; в, е – границы покрытий Mo-Cu и W-Cu с основой соответственно (косой шлиф)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан метод электро-взрывного напыления композиционных покрытий различных систем (W–Cu, Mo–Cu, W–C–Cu, Mo–C–Cu, Ti–B–Cu) со слоистой или наполненной микрокристаллической структурой. Определен комплекс характеристик топографии их поверхности – параметры шероховатости R_a , R_{max} и S_m . При напылении единичных слоев их толщина достигает 0,14 мм, а при последовательном напылении нескольких слоев толщина покрытий может достигать 2 мм и в пределах этого значения может регулироваться в зависимости от условий эксплуатации конкретной номенклатуры упрочняемых деталей. Износостойкость покрытий увеличивается до 2 раз, а электроэрозионная стойкость в условиях искровой эрозии – до 10 раз по сравнению с электротехнической медью М00.

Результаты работы могут быть использованы для упрочнения медных электрических контактов различной электротехнической аппаратуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м и госзадания Минобрнауки 2708ГЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Д. // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175, № 5. С. 515.
2. Иванов Л. И., Дедюрин А. И., Боровицкая И. В. и др. // Перспектив. материалы. 2006. № 5. С. 79.
3. Иванов Л. И., Дедюрин А. И., Боровицкая И. В. и др. // Перспектив. материалы. 2007. Т. 1, спец. вып. С. 158.
4. Романов Д. А., Будовских Е. А., Громов В. Е. Электровзрывное напыление электроэрозионно-стойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионно-стойких покрытий методом электровзрывного напыления. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publ. GmbH & Co. KG, 2012.
5. Будовских Е. А., Ващук Е. С., Громов В. Е. и др. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке. Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011.
6. Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Будовских Е. А. и др. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012.
7. Жмакин Ю. Д., Романов Д. А., Будовских Е. А. и др. // Пром. энергетика. 2011. № 6. С. 22.
8. Багаутдинов А. Я., Будовских Е. А., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. Новокузнецк: Изд-во СиБГИУ, 2007.
9. Мэттьюз М., Ролингс Р. Композиционные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004.
10. Романов Д. А., Будовских Е. А., Громов В. Е. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исследования. 2011. № 11. С. 95.
11. Романов Д. А., Будовских Е. А., Громов В. Е. // Физика и химия обраб. материалов. 2011. № 5. С. 51.
12. Романов Д. А., Будовских Е. А., Громов В. Е. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 10. С. 19.
13. Романов Д. А., Будовских Е. А., Жмакин Ю. Д., Громов В. Е. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2011. № 6. С. 20.
14. ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1988.
15. Будовских Е. А., Громов В. Е., Романов Д. А. // Докл. РАН. 2013. Т. 449, № 1. С. 25.