

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ, УПРОЧНЕННЫЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

В.В. Почету́ха, Д.А. Романов, Е.С. Вашук, А.Д. Филяков  
*Сибирский государственный индустриальный университет,  
ул. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия, v.pochetukha@mail.ru,  
romanov\_da@physics.sibsiu.ru, vashchuk@bk.ru, filyakov.1999@mail.ru*

В настоящем материале сообщается о получении электроэрозионностойких покрытий систем  $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag}$  методом электровзрывного напыления на поверхности медных электрических контактов. Взаимодополняющими методами современного физического материаловедения выполнены исследования структуры и свойств покрытий указанных систем. Во всех исследуемых системах структура покрытий представляет собой композицию на основе серебряной матрицы, упрочненной высокопрочными высокомолекулярными частицами с размерами от нанокристаллического, субмикроструктурного и до микрокристаллического. Среди свойств покрытий исследованы наиболее показательные общие характеристики покрытий, предназначенных для работы в условиях искровой и дуговой электрической эрозии при коммутации электрических контактов постоянного и переменного тока большой мощности. Конкретно исследованы следующие свойства: микротвердость, нанотвердость, модуль Юнга, коэффициент трения, износостойкость, электропроводность, коммутационная износостойкость. Установлено кратное повышение всех исследуемых свойств для всех типов впервые созданных покрытий по сравнению с медными электрическими контактами. Примененные режимы электровзрывного напыления обеспечивают формирование покрытий с высокой адгезией, сопоставимой с покрытиями, полученными методом детонационно-газового напыления. Всем способам создания покрытий обеспечена патентная защита Российской Федерации.

**Ключевые слова:** электроэрозионностойкое покрытие; электрический контакт; композиционная структура; свойства; серебро; высокопрочная высокомолекулярная фаза; электровзрывное напыление.

## ELECTRICAL CONTACTS STRENGTHENED BY ELECTRO-EROSION- RESISTANT COATINGS OBTAINED BY ELECTRO-EXPLOSIVE SPRAYING: STRUCTURE AND PROPERTIES

V.V. Pochetukha, D.A. Romanov, E.S. Vashchuk, A.D. Filyakov  
*Siberian State Industrial University, 42 Kirov Str., 654007 Novokuznetsk, Russia,  
v.pochetukha@mail.ru, romanov\_da@physics.sibsiu.ru,  
vashchuk@bk.ru, filyakov.1999@mail.ru*

This material reports on the production of electrical erosion-resistant coatings of the  $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag}$  systems using the electroexplosive spraying method on the surface of copper electrical contacts. The structure and properties of the coatings of the above systems were studied using complementary methods of modern physical materials science. In all the systems under study, the coating structure is a composition based on a silver matrix reinforced with high-strength high-modulus particles ranging in size from nanocrystalline, submicrocrystalline to microcrystalline. Among the coating properties, the most indicative general characteristics of the coatings intended for operation under conditions of spark and arc electrical erosion during switching of high-power AC and DC electrical contacts were studied. The following properties were specifically studied: microhardness, nanohardness, Young's modulus, friction coefficient, wear resistance, electrical conductivity, switching wear resistance. A multiple increase in all the studied properties for all types of the newly created coatings was established in comparison with copper electrical contacts. The applied modes of electroexplosive spraying ensure the formation of coatings with high adhesion, comparable to coatings obtained by the method of detonation-gas spraying. All methods of creating coatings are provided with patent protection in the territory of the Russian Federation. The coatings were created on a unique, first-ever developed and manufactured installation for electroexplosive spraying (alloying) "EES-A installation", manufactured in 2025. The initial components subjected to electrical explosion were silver foil and powders of high-strength, high-modulus phases. The specific choice of one or another phase depended on the coating system being created.

**Keywords:** electroerosion-resistant coating; electrical contact; composite structure; properties; silver; high-strength high-modulus phase; electroexplosive spraying.

## Введение

Экспертные оценки предполагают в течение ближайших лет многократный рост электроэнергетического рынка Союзного государства в связи с развитием производства электрического пассажирского и грузового автотранспорта, беспилотных летающих аппаратов, накопителей электроэнергии для регулирования нагрузок в электросетях при генерировании и распределении электроэнергии. Это, в свою очередь, предполагает рост производства и применения высокоэффективных и экономичных электроэрозионностойких электрических контактов [1]. Нашей исследовательской группой предлагается новая альтернативная методика создания электроэрозионностойких покрытий за счет применения метода электровзрывного напыления [2]. Целью настоящего материала является рассмотрение вопросов формирования структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий систем  $TiB_2$ –Ag,  $TiB_2$ –Ni–Ag и  $Al_2O_3$ –Ag, полученных методом электровзрывного напыления.

## Результаты и обсуждение

Покрытия систем  $TiB_2$ –Ag,  $TiB_2$ –Ni–Ag и  $Al_2O_3$ –Ag наносили на медные электрические контакты с применением методики электровзрывного напыления на установке ЭВН–Л, разработанной в лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий нашего университета. В результате комплекса проведенных исследований удалось установить следующие ключевые аспекты.

Впервые в мировой практике получены покрытия систем  $TiB_2$ –Ag,  $TiB_2$ –Ni–Ag и  $Al_2O_3$ –Ag с использованием метода электровзрывного напыления. Методом рентгеноспектрального анализа установлено наличие основных элементов: серебра и высокопрочных высокомодульных частиц. Электровзрывное напыление покрытия создает на поверхности образцов неоднород-

ный слой серебристо-серого цвета с рельефом, сформированным течением расплава по поверхности и осаждением конденсированных частиц из гетерогенного плазменного потока. Основными его элементами являются тонкие вытянутые линии, контуры течений и обособленные глобулярные выступы. Основная часть покрытия сформирована в результате воздействия инерционной крупнодисперсной составляющей плазменного пучка.

Микроструктура покрытий представлена серебряной матрицей с включениями упрочняющей фазы матричной составляющей. На границе между покрытием и медной подложкой присутствуют периодические волнообразные структуры с микрометровым размером волн, образовавшиеся в результате гидродинамических неустойчивостей в процессе нанесения покрытия. Упрочняющая фаза представлена двумя типами включений. Крупные включения имеют вытянутую форму со средней длиной 43 мкм. В структуре серебряной матрицы покрытия наблюдается множество частиц со средним размером 0,36 мкм, образовавшиеся в результате неравновесных условий кристаллизации. Также имеются включения субмикронного и нанометрового диапазонов.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа в образцах покрытий обнаружены следующие фазы: твердые растворы на основе Ag, Cu, Ni и высокопрочные высокомодульные частицы. Их массовые доли отличаются от одного образца к другому.

Тонкая структура покрытий, выявленная методом просвечивающей электронной микроскопии, представлена субмикронными и наноразмерными фазами различной морфологии: округлыми, прямоугольными и в виде оболочек – ГЦК твердых растворов на основе серебра и меди, а также высокопрочными высокомодульными частицами.

После электровзрывного напыления покрытий значение нанотвердости составляет  $H = 4.56 \pm 0.42$  ГПа, а модуля Юнга  $E = 120 \pm 25$  ГПа. Вне зависимости от режима обработки микротвердость зависит от того, попадает ли индентор в серебряную матрицу или включения других упрочняющих фаз. В серебряной матрице значение микротвердости по Виккерсу изменяется в пределах 0.26–0.27 ГПа. В местах включений значение микротвердости по Виккерсу изменяется в пределах 26–31 ГПа. Средний коэффициент трения сформированных покрытий колеблется в пределах  $\mu = 0.51$ –0.615. Скорость износа при этом уменьшилась.

Достигнуты значения 8000 циклов включений/отключений и низкое электрическое сопротивление  $R = 10.15$ –11.74 мкОм при испытаниях на коммутационную износостойкость пускателей марки CJ20 в соответствии с требованиями режима испытаний АС-3 при работе в трехфазной цепи с использованием переменного тока и индуктивной нагрузки согласно ГОСТ 2933-83. Например, на момент начала испытаний на электроэрозионную стойкость образец с покрытием системы  $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$  демонстрирует наибольшие значения сопротивления, которое для фаз R1, R2 и R3 равно 11.68, 11.71 и 11.74 мкОм соответственно. Увеличение числа циклов переключений до 1000 приводит к резкому снижению сопротивления исследуемых покрытий. Полученные значения

для фаз R1, R2 и R3 равны 11.57, 11.55 и 11.54 мкОм соответственно. Дальнейшее увеличение числа испытательных циклов до 2000 приводит к росту сопротивления до 11.62 мкОм.

Выявлен оптимальный (с точки зрения структурно-фазовых состояний и результатов испытаний микротвердости, нанотвердости, модуля упругости, износостойкости, коэффициента трения, тестов на электроэрозионную стойкость) режим электровзрывного напыления покрытий систем  $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ .

### Заключение

Таким образом, в результате проведенного комплексного исследования структуры и свойств удалось получить коммерчески применимые электроэрозионностойкие покрытия систем  $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ag}$  за счет использования новой методики электровзрывного напыления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>.

### Библиографические ссылки

1. Akbi M. Effects of Arcing in Air on the Microstructure and Morphology of Silver-Based Contact Materials in Correlation with their Electron Emission Properties. *IEEE Transactions on Plasma Science* 2016; 44(9): 1-11.
2. Почетуха В.В., Романов Д.А., Громов В.Е. Электроэрозионностойкие контакты в автомобильном и железнодорожном транспорте. Новокузнецк: ООО «Полиграфист»; 2024. 200 с.