

**РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ КОНТАКТОВ
ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СОЧЕТАЮЩЕЙ
ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЕ НАПЫЛЕНИЕ И ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ
МОДИФИЦИРОВАНИЕ**

Будовских Е.А., Романов Д.А., Московский С.В., Громов В.Е.
*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,
Россия, budovskikh@mail.ru*

Одной из составляющих национальной безопасности РФ до 2020 года (утверждена Указом Президента РФ от 12.05.2009 г. № 537) является обеспечение энерго-экологической безопасности. Повышение пожаробезопасности, надежности и экономичности электроустановок и, в частности, их электрических контактов является одним из приоритетных направлений обеспечения энергетической безопасности. Таким образом, разработка новых материалов для электрических контактов является важной проблемой. К перспективным методам формирования таких покрытий относится электровзрывное напыление импульсными многофазными плазменными струями. В связи с вышеизложенным проблема представляется актуальной.

Перспективным направлением развития способа электровзрывного напыления композиционных материалов является модифицирование покрытий высокоинтенсивными электронными пучками. Образование в поверхностном слое неравновесных структурно-фазовых состояний при электронно-пучковом облучении в субмиллисекундном диапазоне времени воздействия определяется сверхвысокими скоростями нагрева (до 10^6 К/с) тонкого поверхностного слоя материала (10^{-4} – 10^{-3} мм) до температур плавления и формирование предельных градиентов температуры (до 10^7 – 10^8 К/м), обеспечивающих охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью 10^4 – 10^6 К/с. По сравнению с мощными ионными пучками, которые также могут быть использованы для модификации поверхности материалов, низкоэнергетические (< 30 кэВ) плотные электронные пучки генерируются с существенно более высоким коэффициентом полезного действия (более 90%) в частотно-импульсном (~ 10 с $^{-1}$) режиме при меньших (на порядок величины) ускоряющих напряжениях и не требуют создания специальной радиационной защиты, т.к. сопутствующее рентгеновское излучение экранируется стенками рабочей вакуумной камеры. Высокая энергетическая эффективность, более высокая однородность плотности энергии по сечению потока, хорошая воспроизводимость импульсов и высокая частота их следования выгодно отличают импульсные электронные пучки также и от импульсных потоков низкотемпературной плазмы при потенциальном использовании тех и других в технологических целях. Международный приоритет в области разработки импульсных электронно-пучковых устройств на основе плазменных катодов, в том числе и для обработки поверхности материалов, принадлежит ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН» (ИСЭ СО РАН). В настоящее время ИСЭ СО РАН располагает самым современным комплексом научно-исследовательского оборудования для импульсного электронно-пучкового облучения материалов в широком (в том числе и неисследованном) диапазоне значений параметров облучения – комплексом уникальных электрофизических установок для эффективной электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий «УНИКУУМ» (УНУ «УНИКУУМ»). Обладая международным приоритетом в области разработки импульсных электронно-пучковых устройств на основе плазменных катодов, имея высокий уровень профессионализма, широкий доступ к современному аналитическому оборудованию, значительный объем положительных результатов предварительно выполненных исследований по заявляемой тематике, коллектив исполнителей проекта полагает, что полученные в работе результаты будут являться оригинальными и обладать мировым уровнем новизны.

Настоящая работа будет выполнена в рамках общего направления развития научных исследований и практических разработок – защиты поверхности путем

напыления покрытий с использованием концентрированных потоков энергии. Целью работы является формирование электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления и последующего электронно-пучкового миксинга (в том числе с использованием азотирования электровзрывных покрытий для формирования нитридов с целью упрочнения поверхностного слоя покрытия), изучение их структуры, фазового состава и свойств. Покрытия будут исследованы с помощью следующего оборудования: оптический микроскоп, растровый электронный микроскоп, просвечивающий электронный микроскоп, рентгеновский дифрактометр, оптический интерферометр. Будут проведены испытания покрытий на износостойкость и электроэрозионную стойкость, нанотвердость и модуль Юнга. В результате выполнения проекта будет установлена физическая природа формирования структуры и свойств электровзрывных электроэрозионностойких композиционных покрытий систем Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-C и Ag-Co после электронно-пучкового миксинга, в том числе с использованием азотирования электровзрывных покрытий. Полученные в настоящем проекте результаты послужат стимулом для дальнейших исследований в области электровзрывного напыления и электронно-пучкового миксинга электроэрозионностойких покрытий.

В ходе выполнения программы будут выполнены следующие работы:

1. Аналитический обзор информационных источников, а именно, осуществлены патентные исследования по тематике проекта; проведен анализ российской и зарубежной научно-технической периодики за последние два десятилетия; выполнена сравнительная оценка эффективности и сделано обоснование выбора оптимального варианта направления исследований.

2. Сформированы электровзрывные электроэрозионностойкие покрытия систем Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-C и Ag-Co на медных электрических контактах переключателей мощных электрических сетей различной номенклатуры.

3. Проведен электронно-пучковый миксинг на установке СОЛО УНУ «УНИКУУМ» в широком диапазоне параметров пучка (плотность энергии 10–40 Дж/см², длительность 50–200 мкс и количество 1–50 импульсов воздействия).

4. Проведен электронно-пучковый миксинг на установке КОМПЛЕКС УНУ «УНИКУУМ». В отличие от обработки на установке СОЛО будет осуществлено более длительное облучение (до 500 мкс в одном импульсе).

5. Проведена комбинированная, в едином вакуумном цикле (установка КОМПЛЕКС УНУ «УНИКУУМ»), обработка, сочетающая электронно-пучковый миксинг с последующим азотированием электровзрывных покрытий систем Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-C и Ag-Co с целью упрочнения поверхностного слоя покрытия путем формирования нитридов и карбонитридов, а также пересыщенных твердых растворов. Вышеперечисленная в п. 3–5 обработка позволит снизить степень шероховатости, повысить твердость, износостойкость, электроэрозионную стойкость, гомогенизировать объем электровзрывных электроэрозионностойких покрытий систем Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-C и Ag-Co.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-20007).