

## СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ CuO-Ag

Московский С.В., Романов Д.А., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,  
Россия,  
psk-svm@yandex.ru*

Безопасность работы энергосистем, снижение потерь электроэнергии и экономия материальных ресурсов во многом определяется надежностью электрических контактов. Надежность электрических контактов обуславливает эффективность эксплуатации энергетического и промышленного оборудования, и в целом мировой энергосистемы. Из-за некачественных контактов происходит их нагрев, возрастают потери электроэнергии и возникают аварийные ситуации. По данным национальной ассоциации спасательных и экологических организаций 50% возгораний на промышленных предприятиях и в жилом фонде происходит из-за неисправности электроустановок, при этом 50% пожаров электрооборудования обусловлено отказами электрических контактов.

Объектом исследований являлись медные контакты контактора КПВ-604, на контактных поверхностях которых электровзрывным методом было сформировано системы CuO-Ag. В качестве взрывающего токопроводящего материала была использована фольга серебра массой 250 мг, на поверхность которой в область взрыва помещалась навеска порошка CuO массой 120 мг. Время воздействия плазмы на поверхность образца ~100 мкс, поглощаемая плотность мощности на оси струи ~5,5 ГВт/м<sup>2</sup>, давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности ~12,5 МПа, остаточное давление газа в рабочей камере ~100 Па; температура плазмы на срезе сопла ~10<sup>4</sup> К, толщина зоны термического влияния ~50 мкм. Структуру и морфологию покрытия и прилегающего слоя подложки анализировали методами сканирующей (прибор Carl Zeiss EVO50) с приставкой для рентгеноспектрального анализа EDAX и атомно-силовой микроскопии (прибор Solver NEXT). Испытания на электроэрозионную стойкость покрытий в условиях дуговой эрозии проводили на контактах электромагнитных пускателей марки CJ20 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  $\cos\phi = 0,35$  и числе коммутационных циклов 6000.

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры и элементного состава поперечного шлифа системы «покрытие/подложка» сформированной электровзрывным методом. Анализ полученных результатов показывает, что сформированное покрытие является однородным по структуре композиционным материалом. По морфологии структуры и контрасту травления формирующееся покрытие состоит из светлой серебряной матрицы и темных включений CuO с размерами, изменяющимися в пределах от 0,3 до 0,5 мкм. Элементный состав покрытия анализировали методами микрорентгеноспектрального анализа. Анализируя результаты можно отметить, что концентрации меди, кислорода и серебра в покрытии незначительно изменяются по его толщине. Этот факт также свидетельствует о структурной однородности полученного покрытия.

Атомно-силовую микроскопию проводили в слое покрытия, расположенном на расстоянии 10 мкм от поверхности покрытия, а также на границе раздела между покрытием и медной подложкой. Поскольку электровзрывное покрытие образовано серебряной матрицей и расположенными в ней частицами порошка CuO, то мелкие частицы порошка CuO могут выкрашиваться из матрицы при приготовлении шлифа. В этом случае на месте выпавших частиц образуются поры глубиной от 30 до 100 нм и шириной от 2 до 5 нм. Частицы CuO диспергируются до 2...5 нм в процессе электрического взрыва при формировании импульсной плазменной струи продуктов электрического взрыва проводников.

Также выявляются отдельные крупные частицы различной формы с размерами от 10 до 15 нм. Эти частицы CuO не выкрашиваются из серебряной матрицы при

приготовлении шлифа, резко выделяются цветом (они более светлые по сравнению с матрицей). Они хаотически расположены в серебряной матрице. Крупные частицы имеют сложное строение. Характерными структурными единицами, из которых они состоят являются сферы (глобулы) диаметром от 2 до 5 нм (это мелкие сферические частицы, описанные выше). Соотношение серебряной матрицы, крупных и мелких частиц порошка  $\text{CuO}$  составляет 0,6:0,15:0,25. Если учесть, что крупные частицы  $\text{CuO}$  состоят из более мелких глобулярных частиц  $\text{CuO}$ , то соотношение серебряной матрицы и включений порошка  $\text{CuO}$  составляет 0,6:0,4. Это соотношение пропорционально содержанию порошка  $\text{CuO}$  и серебряной фольги, используемых для электровзрывного напыления. Средняя шероховатость профиля поверхности покрытия системы  $\text{CuO-Ag}$  составляет 100 нм.

Таким образом удалось выявить важный структурный элемент – глобулу  $\text{CuO}$ , частицу сферической формы диаметром от 2 до 5 нм. Налицо многоуровневая иерархическая структура покрытия системы  $\text{CuO-Ag}$  в основе которой лежат однотипные сферические частицы  $\text{CuO}$  диаметром от 2 до 5 нм. Единая структурная единица, из которой состоят включения  $\text{CuO}$ , расположенные в серебряной матрице – очень важный аргумент в пользу фрактального механизма формирования электровзрывного покрытия. Такие частицы составляют первый иерархический уровень структуры электровзрывного покрытия системы  $\text{CuO-Ag}$ . Второй иерархический уровень составляют глобулы крупные частицы различной формы с размерами от 10 до 15 нм, которые в свою очередь, формируют седимент частицы микронных размеров неправильной формы, выявленные методом сканирующей электронной микроскопии.

На границе раздела между покрытием и медной подложкой различимы темные впадины размером от 10 до 15 нм. Из них выкрошились крупные частицы  $\text{CuO}$ , о которых речь шла выше. Кроме того на границе раздела покрытие/подложка в серебряной матрице возникают поверхностные периодические структуры (ППС). Секущая, проведенная перпендикулярно данным структурным образованиям дает основание утверждать, что длина волны в них составляет в среднем 3 нм. Структуры представляют собой остаточный нанорельеф поверхности. После окончания воздействия импульсной плазменной струи продуктов электрического взрыва проводников на подложку и остывания поверхности наведенный рельеф закрепляется в виде ППС. Конкретными процессами их образования могут быть испарение, оплавление поверхности и вытеснение расплава избыточным давлением паров, термокапиллярные явления и термохимические реакции, термические деформации, возникновение и развитие различных неустойчивостей, таких как Релея-Тейлора, Кельвина-Гельмгольца, Марангони и др. В целом явление носит универсальный характер и представляет собой пример самоорганизации в системе, где изначально отсутствуют выделенные направления и структуры. Энергетические режимы получения ППС соответствуют нагреву материала до температуры, примерно равной температуре плавления (нижний предел), но не выше температуры развитого испарения. Именно такой режим был использован при электровзрывном напылении в настоящей работе.

Профилометрия поверхности показала, что параметр шероховатости электровзрывного покрытия системы  $\text{CuO-Ag}$  составляет 73 нм. Максимальный выступ профиля в этом случае достигает значения 536,85 нм, а впадина – 497,5 нм. Сравнивая параметры шероховатости на границе электровзрывного покрытия с подложкой со значением параметра шероховатости в слое покрытия, расположенном на расстоянии 10 мкм можно отметить, что они отличаются на 28 %. На рис. 3, а 35 % фотографии занимает подложка, а 65 % – покрытие. Это дает основание заключить, что шероховатость подложки ниже шероховатости покрытия. Это является закономерным, поскольку из-за выпавших из серебряной матрицы включений  $\text{CuO}$  параметр шероховатости покрытия увеличивается.

Механизм сборки такого сложного многоуровневого  $\text{CdO}$  в серебряной матрице можно представить следующим образом. Единый размер  $r_1$  сферических частиц  $\text{CdO}$  первого уровня иерархии может быть объяснен в рамках модели диффузионно-лимитированной агрегации по механизму диффузионно-лимитируемой агрегации

«частица-кластер». В кластер, который превратится затем в сферу диаметром от 2 до 5 нм, собираются плазменные компоненты многофазной струи продуктов электрического взрыва проводников, распределенные в некотором эффективном объеме на некотором эффективном пространстве интерфейса подложки того же размера. Следует отметить, что размер эффективного объема, в котором происходит образование заготовок сферических частиц первого уровня иерархии, будет зависеть от состава взрывааемых проводников и температуры. Образование кластеров CdO происходит только на начальной стадии воздействия импульсной плазменной струи на подложку. На следующей стадии роста механизм агрегации «частица-кластер» перестает действовать, но размеры кластеров увеличиваются. Рост начинается одновременно и заканчивается синхронно по исчерпанию нахождения CdO в плазменном состоянии, кластеры превращаются в частицы практически одинаковых размеров (при обсуждаемых условиях это сферы диаметром от 2 до 5 нм). Размеры частиц недостаточно велики, чтобы гравитационные силы могли доминировать. Иными словами: имеет место метастабильное состояние, в котором сферы диаметром от 2 до 5 нм поддерживаются во взвешенном состоянии в основном за счет броуновского движения и сил межмолекулярного взаимодействия с другими компонентами расплавленного металла. Под действием броуновских сил сферы продолжают хаотическое движение, которое стимулирует их агломерацию. Самосборка частиц первого иерархического уровня приводит к образованию второго иерархического уровня глобул размером  $r_2$  от 10 до 15 нм. Образование этого иерархического уровня происходит в основном по кластер-кластерному механизму. Далее такие глобулярные частицы могут укрупняться за счет слипания в частицы микрометрового диапазона.

Таким образом, предложен механизм образования иерархических уровней структуры электровзрывных покрытий системы CuO-Ag. Путем сопоставления изображений атомно-силовой микроскопии поверхности слоев электровзрывных покрытий системы CuO-Ag установлены типичные размеры первого и второго иерархических уровней структуры, которые при использованных условиях напыления составляли от 2 до 5 нм и от 10 до 15 нм соответственно. Механизм самосборки иерархических наноструктур основан на теоретических представлениях образования и эволюции фрактальных агрегатов при диффузионно-лимитируемой и кластер-кластерной агрегациях. Такие электровзрывные покрытия используются для создания контактов переключателей мощных электрических сетей.

На границе покрытие/подложка обнаружены поверхностные периодические структуры с длиной волны в среднем 3 нм. Они представляют собой остаточный нанорельеф поверхности, возникший после окончания воздействия импульсной плазменной струи продуктов электрического взрыва проводников на подложку и остывания поверхности.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00013).*