

## СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПСЕВДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ МОЛИБДЕН – МЕДЬ

Романов Д. А., Будовских Е. А., Громов В. Е.

ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,  
г.Новокузнецк, Россия,  
[romanov\\_da@physics.sibsiu.ru](mailto:romanov_da@physics.sibsiu.ru)

Композиционные материалы (КМ) системы молибден-медь обладают высокой электроэрозионной стойкостью. Псевдосплавные молибден-медные КМ находят практическое применение, в частности, в средне- и тяжелонагруженных выключателях в качестве материала покрытий на контактных поверхностях коммутационных аппаратов [1]. Цель настоящей работы заключалась в формировании и изучении структурно-фазовых состояний таких покрытий при воздействии на поверхность плазменных струй, сформированных из продуктов электрического взрыва проводников.

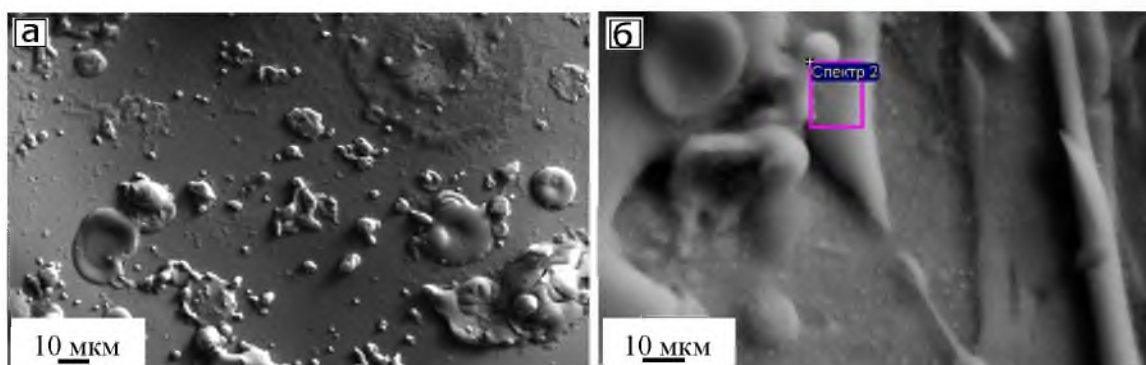
Электровзрывную обработку проводили с использованием лабораторной установки ЭВУ 60/10 [2]. Она включает емкостный накопитель энергии и импульсный плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы токоподводящих электродов с размещенным на них проводником, разрядной камеры, локализующей продукты взрыва и переходящей в сопло, по которому они истекают в вакуумируемую технологическую камеру с остаточным давлением 100 Па. Электровзрыв происходит в результате пропускания через проводник (фольгу) тока большой плотности при разряде конденсаторной батареи. Продукты взрыва с помощью плазменного ускорителя направляются на контактную поверхность.

Для формирования псевдосплавного покрытия молибден-медь в качестве материала взрываемого проводника использовали полоску молибденовой фольги с размерами 50×20 мм и толщиной 20 мкм, а также круглую медную фольгу диаметром 50 мм толщиной 15 мкм. Взрываемые фольги имели массу 150 и 250 мг для молибденовой и медной фольги, соответственно. Обработке подвергали медные контактные поверхности с размерами 20×30 мм. Контактную поверхность ориентировали перпендикулярно к оси плазменной струи. При этом расстояние облучаемой поверхности от среза сопла электровзрывного ускорителя и значение зарядного напряжения емкостного накопителя энергии обеспечивало достижение необходимой плотности мощности.

Псевдосплавные молибден-медные покрытия получали при двукратной импульсной плазменной обработке медной контактной поверхности. Первый раз струю формировали из продуктов электрического взрыва молибденовой фольги при поглощаемой плотности мощности 6,0 ГВт/м<sup>2</sup>, второй раз – из продуктов взрыва медной фольги при поглощаемой плотности мощности 7,6 ГВт/м<sup>2</sup>. Формирование псевдосплава происходило при перемешивании меди и молибдена в жидком состоянии с последующим теплоотводом в материал контактной поверхности.

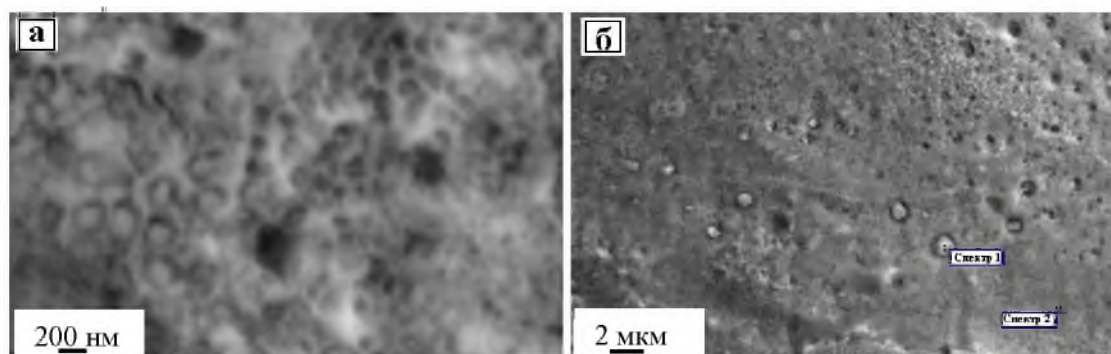
Исследования топографии поверхности проводили с использованием оптического интерферометра Zygo NewView™ 7300. Шероховатость R<sub>a</sub> составляет 3 мкм, что является приемлемым для контактных поверхностей.

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено, что на поверхности неравномерно распределено большое количество микрокапель, осевших на ней из тыла струи (рис. 1 а). Размеры капель изменяются в пределах от 1 до 100 мкм. Микрорентгеноспектральный анализ области расположения одной из капель показывает (рис. 1 б), что она образована псевдосплавом молибден-медь. Содержание меди в ней 68, молибдена – 32 ат. %.



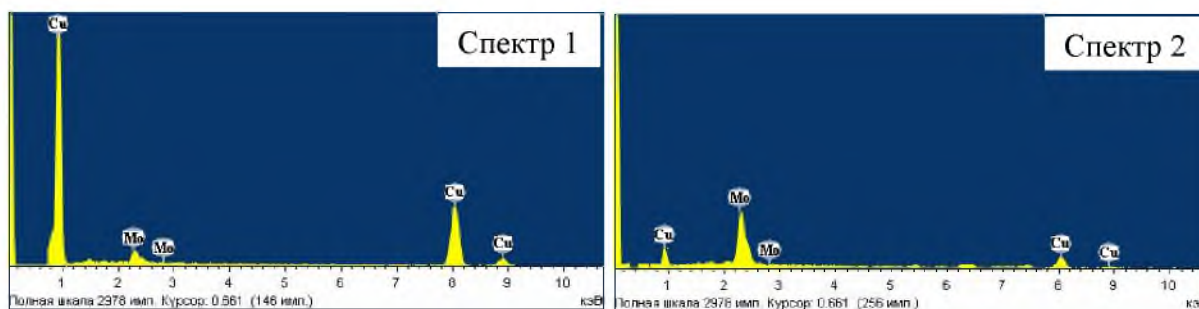
**Рис. 1.** СЭМ поверхности электровзрывного псевдосплавного покрытия молибден–медь

СЭМ косых шлифов показывает, что частицы меди с размерами 30...200 нм равномерно распределены в молибденовой матрице в приповерхностном слое (рис. 2 а). Также есть частицы меди, максимальный размер которых достигает 1 мкм. Некоторые из них выкрашиваются в процессе приготовления шлифа (рис. 2 б).



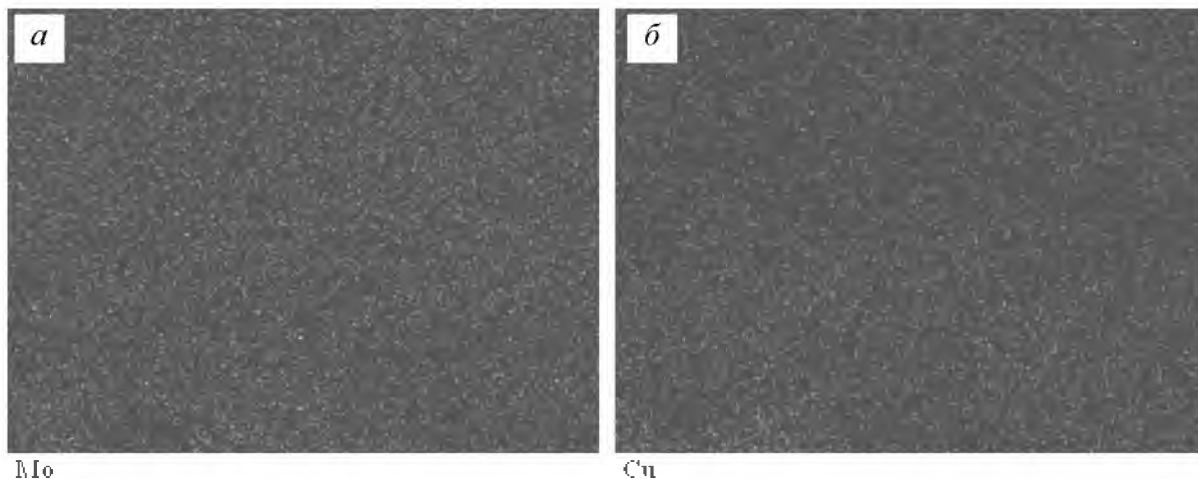
**Рис. 2.** СЭМ косых шлифов электровзрывного псевдосплавного покрытия молибден–медь

Микрорентгеноспектральный анализ для спектра 1 на рис. 2 б подтверждает, что основным элементом этой области является медь (рис. 3). Содержание меди для этой области составляет 93, молибдена – 7 ат. %. Микрорентгеноспектральный анализ для спектра 2 на рис. 2 б показывает, что спектр содержит медь и молибден в количестве 44 и 56 ат. % соответственно (рис. 3).



**Рис. 3.** Микрорентгенограммы электровзрывного псевдосплавного покрытия молибден–медь

Для области, изображенной на рис. 2 а, построены карты распределения меди и молибдена. Их анализ показывает, что в сформированном покрытии молибден и медь распределены равномерно. Участки, содержащие только медь или молибден (без взаимного перемешивания) не выявлены. Сформированная структура с равномерным распределением компонентов обуславливает высокую электроэрозионную стойкость покрытий.



**Рис. 4.** Карты распределения молибдена (а) и меди (б)

При формировании псевдосплавного покрытия в более жестком режиме, при электровзрыве медной фольги, когда поглощаемая плотность мощности составляла  $10,0 \text{ ГВт/м}^2$ , наблюдается уменьшение содержания наноразмерных и субмикрочастичек меди в молибденовой матрице и увеличение содержания частиц с размерами до  $1 \text{ мкм}$ .

Таким образом, впервые способом электровзрывного легирования получены поверхностные слои из несмешивающихся компонентов меди и молибдена, применяемые в электротехнике в качестве электроэрозионных контактов. Определены оптимальные параметры нанесения таких покрытий. Показано, что покрытия имеют субмикрочастичеческую структуру.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантом РФФИ (проект №№ 08-02-00024) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гос. контракт № П332).*

#### **Список литературы**

1. Гречанюк Н.И. // Современная электрометаллургия. 2005. № 2. С. 28–35.
2. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов: моногр. / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк, СибГИУ. – 2007. – 301 с.