

УДК 621.785:669.1.08.29

*Д.А. Романов¹, О.В. Олесюк¹, Е.А. Будовских¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов^{2,3}, А.Д. Тересов²*¹Сибирский государственный индустриальный университет²Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)³Национальный исследовательский Томский политехнический университет**СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ Cu-Mo, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ***

Композиционные материалы системы молибден – медь обладают стойкостью к электрической эрозии, на порядок более высокой по сравнению со стойкостью контактной меди [1]. В настоящее время разработаны физические основы электровзрывного напыления (ЭВН) покрытий системы молибден – медь [2]. Перспективным направлением развития способов ЭВН композиционных материалов является модифицирование этих покрытий высокоинтенсивными электронными пучками [3].

Цель настоящей работы заключалась в модифицировании высокоинтенсивными электронными пучками электровзрывных композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы Cu – Mo и изучения их структуры.

Электровзрывное напыление покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, описание которой приведено в работе [2]. Установка 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 проводник тока большой плотности при разряде накопителя.

Покрытия наносили на электрические контакты размерами 20×30×2 мм из электротехнической меди марки М00. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плот-

ность мощности [4]. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого материала для нанесения покрытий; в настоящей работе использовали двуслойную медную фольгу с заключенной в ней навеской порошка молибдена. Поглощаемая плотность мощности при напылении составляла 4,1 ГВт/м², диаметр молибденового сопла – 20 мм, расстояние образца от среза сопла – 20 мм. Массы фольги и порошковой навески составляли 238 и 272 мг.

Модификацию электрических контактов из электротехнической меди, подвергнутых электровзрывному напылению, осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком, позволяющим плавить поверхностный слой с последующим высокоскоростным охлаждением за счет отвода тепла в объем материала. Использовали установку «СОЛО», разработанную и созданную в Институте сильноточной электроники СО РАН [5]. Режимы электронно-пучковой обработки (ЭПО) представлены ниже:

Режим	Параметры ЭПО		
	E_s , Дж/см ²	t , мкс	N , имп.
1	45	100	10
2	50	100	10
3	55	100	10
4	60	100	10
5	60	200	20

П р и м е ч а н и е. E_s – плотность энергии пучка электронов; t и N – длительность и количество импульсов.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50.

Исследования поверхности облучения, осуществленные методами сканирующей элек-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

тронной микроскопии, показали, что обработка образцов электронным пучком в указанном интервале параметров приводит к кардинальным преобразованиям поверхности образцов. В центральной части зоны воздействия пучка электронов (область, размеры которой увеличиваются от 10 мм при плотности энергии пучка электронов 45 Дж/см^2 до 18 мм при 60 Дж/см^2) исчезают микрокапли, микрократеры и микротрещины, описанные ранее в работе [2], рельеф поверхности выглаживается (рис. 1, *a*). Формируется поликристаллическая структура, средний размер зерен которой увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов от 10 мкм при 45 Дж/см^2 до 22 мкм при 50 Дж/см^2 . Увеличение плотности энергии пучка электронов до 60 Дж/см^2 при длительности импульса воздействия 100 мкс сопровождается формированием поликристаллической структуры с высоким уровнем разноразмерности. Размер зерен изменяется в пределах от 3 до 40 мкм. Мелкие зерна группируются в области. Следовательно, при данном режиме облучения в поверхностном слое композиционного покрытия системы Cu – Mo реализуются условия, способствующие протеканию процесса динамической рекристаллизации [6 – 9]. Увеличение длительности воздействия пучка электронов до 200 мкс при этой же плотности энергии пучка электронов приводит к форми-

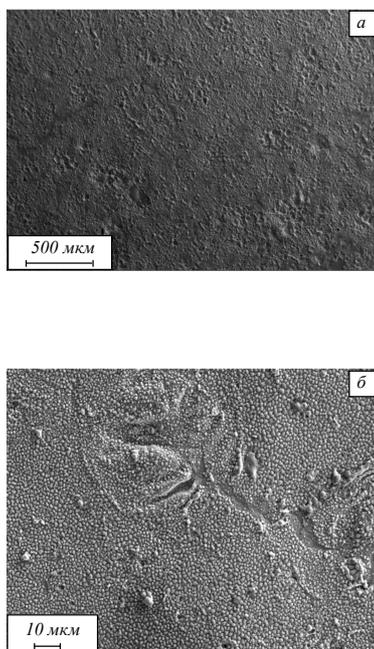


Рис. 1. Морфология (*a*) и ячеистая структура (*б*) поверхности электровзрывного композиционного покрытия системы Cu – Mo, модифицированного высокоинтенсивным электронным пучком (сканирующая электронная микроскопия во вторичных электронах)

рованию более однородной зеренной структуры (размер зерен изменяется в пределах от 10 до 20 мкм).

В объеме зерен, независимо от плотности энергии пучка электронов, выявляется характерная для скоростной кристаллизации [10] ячеистая структура, размер которой изменяется в пределах $0,25 - 0,50 \text{ мкм}$ (рис. 1, *б*).

За пределами центральной зоны образцов наблюдается структура, характеризующаяся различной степенью модификации поверхностного слоя. Поверхность сглаживается по сравнению с поверхностью образцов после ЭВН, однако присутствуют микротрещины и микрократеры.

Соответственно эволюции морфологии поверхности облучения изменяется и элементный состав поверхностного слоя. В центральной зоне фиксируется однородное композиционное покрытие, содержащее молибден и медь в количестве 70 и 30 % (ат.). На границе центральной зоны и за ее пределами области, обогащенные молибденом или медью, сохраняются.

В настоящей работе выполнены исследования фазового и элементного составов, состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя электротехнической меди марки М00, подвергнутого ЭВН композиционного покрытия системы Cu – Mo и последующему облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Выявлены режимы ЭПО, позволяющие формировать плотные, с зеркальным блеском поверхностные слои, обладающие субмикро- и нанокристаллической многофазной структурой.

Электронно-пучковая обработка поверхности электровзрывного напыления сопровождается, как отмечалось выше, выглаживанием поверхности модификации. В свою очередь это приводит к выравниванию толщины модифицированного слоя (рис. 2). Как следует из анализа изображения структуры поперечного шлифа, толщина модифицированного слоя после ЭПО изменяется в пределах от 30 до 50 мкм и незначительно уменьшается с ростом плотности энергии пучка электронов. Плавление модифицированного слоя электронным пучком приводит к устранению дефектов, обусловленных попаданием в расплав частиц порошка молибдена и осколков медной фольги: в модифицированном электронным пучком слое электровзрывного напыления микропоры и микротрещины практически не выявляются (рис. 2; рис. 3, *a*).

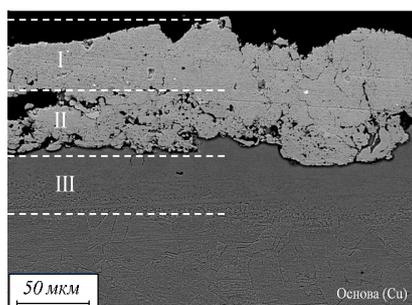


Рис. 2. Морфология поперечного сечения медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН композиционного покрытия системы Cu – Mo и последующей обработке электронным пучком (сканирующая электронная микроскопия в обратно отраженных электронах): I – слой ЭВН и последующей ЭПО; II – слой ЭВН; III – слой термического влияния

Сопровождающаяся плавлением слоя электровзрывного напыления ЭПО приводит к формированию композиционной дисперсно-упрочненной структуры по всему сечению модифицируемого слоя (рис. 3, а). Размеры включений меди изменяются в пределах от 0,1 до 0,2 мкм. В случае ЭВН размеры включений меди изменяются в пределах от 0,1 до 2,0 мкм.

Электронно-пучковая обработка, сопровождающаяся плавлением напыленного слоя, способствует его гомогенизации. Это подтверждается как структурными исследованиями поперечного шлифа (не удалось обнаружить осколки медной фольги в объеме напыленного слоя), так и результатами анализа элементного состава.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что ЭПО слоя ЭВН медных электрических контактов, осуществляемая в режи-

ме плавления, приводит к формированию структурно и концентрационно однородного поверхностного слоя.

Выводы. Впервые проведено модифицирование высокоинтенсивным электронным пучком электровзрывных композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы Cu – Mo. Выполнены исследования фазового и элементного составов, состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя электротехнической меди марки М00, подвергнутого электровзрывному напылению композиционного покрытия системы Cu – Mo и последующему облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Выявлены режимы электронно-пучковой обработки, позволяющие формировать плотные, с зеркальным блеском поверхностные слои, обладающие субмикро- и нанокристаллической структурой на основе молибдена и меди. Выполненные исследования показывают, что электронно-пучковая обработка слоя электровзрывного напыления электротехнической меди марки М00, осуществляемая в режиме плавления, приводит к формированию структурно и концентрационно однородного поверхностного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А н и с и м о в А.Г., М а л и В.И. Исследование возможности электроимпульсного спекания порошковых наноструктурных композитов // Физика горения и взрыва. 2010. № 2. С. 135 – 139.

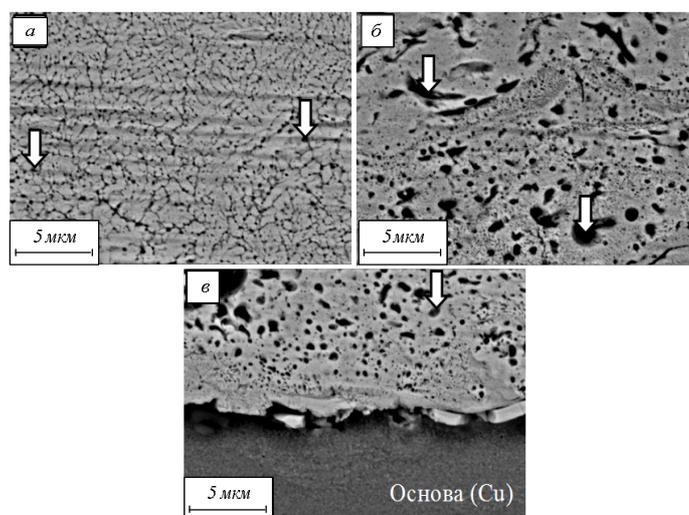


Рис. 3. Структура поперечного сечения медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН композиционного покрытия системы Cu – Mo и последующей обработке электронным пучком (сканирующая электронная микроскопия в обратно отраженных электронах):

а – слой ЭВН и последующей ЭПО; б – слой ЭВН; в – особенности на границе электровзрывного покрытия с основой

2. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.
3. Rotshstein V., Ivanov Yu., Markov A. – Chapter 6 in Book «Materials surface processing by directed energy techniques» / Ed. by Y. Pauleau. – Elsevier, 2006. P. 205-240.
4. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
5. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения. – В кн.: Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под общ. ред. А.И. Потеева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345 – 382.
6. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
7. Рекристаллизация металлических материалов / Ред. Ф. Хесснер. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
8. Лариков Л.Н., Засимчук Е.Э. Механизм рекристаллизации деформированных металлов. – В кн.: Изучение дефектов кристаллического строения металлов и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1966. – С. 70 – 84.
9. Лариков Л.Н. Отдых, полигонизация, рекристаллизация и рост зерен. – В кн.: Физические основы прочности и пластичности металлов. – М.: Металлургиздат, 1963. С. 255 – 322.
10. Наноматериалы: структура, свойства, применение / А.М. Глезер, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.П. Шаркеев. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2010. – 423 с.

© 2013 г. Д.А. Романов, О.В. Олесюк,
Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов,
А.Д. Тересов
Поступила 18 ноября 2013 г.