

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ*

*Д.А. РОМАНОВ, ст. преподаватель
О.В. ОЛЕСЮК, ст. преподаватель
Е.А. БУДОВСКИХ, доктор техн. наук, профессор
В.Е. ГРОМОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор
(СибГИУ, г. Новокузнецк)
Д.С. КРИВЕЖЕНКО, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 12 декабря 2012 года

Романов Д.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова 42, Сибирский государственный индустриальный университет, e-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru

Разработан метод электровзрывного напыления композиционных покрытий систем W–Cu и Mo–Cu или со слоистой, или наполненной микрокристаллической структурой. Определен комплекс характеристик топографии поверхности покрытий. Износостойкость покрытий увеличивается до двух раз, а электроэрозионная стойкость в условиях искровой эрозии – до 10 раз по сравнению с электротехнической медью М00.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электроэрозионностойкие покрытия, псевдосплав, шероховатость, микроструктура, износостойкость, электроэрозионная стойкость.

Введение

Обработка поверхности плазменными струями используется для создания покрытий и модификации свойств материалов, что является одной из основных наиболее важных проблем физического материаловедения [1]. Особенности структуры и свойств упрочняющих и защитных покрытий отражают особенности методов, используемых для их напыления. В последние годы получили развитие импульсные методы напыления покрытий, которые позволяют формировать покрытия, обладающие низкой пористостью, нано- и субмикрокристаллической структурой, высокой адгезией с основой и другими достоинствами, которые недостижимы при использовании традиционных методов газотермического напыления. Так, в работах [2, 3] получены по-

крытия из несмешивающихся компонентов системы W–Cu. Однако они имеют малую толщину и нерегулируемый состав. Широкими технологическими возможностями обладает импульсный метод электровзрывного напыления (ЭВН) [4–6]. В связи с этим целью настоящей работы явилось формирование методом ЭВН электроэрозионностойких покрытий на контактных поверхностях прежде всего из несмешивающихся компонентов систем W–Cu и Mo–Cu, изучение их структуры, фазового состава и свойств.

Материалы и методика исследований

Напыление покрытий проводили с использованием электровзрывной установки ЭВУ 60/10М, которая описана в работах [7, 8]. Она включает емкостный накопитель энергии и им-

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.2065.

пульсный 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 металлическую фольгу тока большой плотности при разряде на нее накопителя [8]. Из продуктов взрыва формируется сверхзвуковая многофазная плазменная струя, которая служит для напыления покрытий при времени импульса 100 мкс. Подробности методики ЭВН покрытий изложены в [4].

Покрывают нанесли на изделия из электро-технической меди марки М00. Использовали медные и молибденовые фольги, а также порошки молибдена или вольфрама с размером частиц 0,1...1,0 мкм. Формировали композиционные покрытия со слоистой и наполненной структурой. Покрывают со слоистой структурой, которые напыляли при тепловом воздействии, вызывающем нагрев поверхности основы до температуры плавления, представляли собой чередующиеся слои молибдена (вольфрама) и меди. Покрывают с наполненной структурой напыляли в условиях, когда поверхность облучения испытывала

оплавление и смешивание материала основы с компонентами многофазной плазменной струи продуктов электрического взрыва фольги и частиц порошковых навесок.

Результаты исследований и их обсуждение

Были получены электроэрозионностойкие покрытия ряда систем, в том числе из несмешивающихся компонентов W-Cu и Mo-Cu [9-12], основные особенности которых рассмотрены ниже.

При ЭВН слоистых покрытий фольгами на поверхности формируются сравнительно гладкие области неправильной формы. При ЭВН слоистых покрытий с дополнительным использованием порошков наблюдаются области с развитым рельефом, образованные частицами порошков. При формировании композиционных покрытий с наполненной структурой на поверхности выделяются хаотически расположенные сравнительно гладкие области неправильной формы и области с развитым рельефом, образованные частицами глобулярной формы с размерами в пределах от 0,5 до 20,0 мкм, суммарная площадь которых составляет 25 и 75 % соответственно. Относительное содержание меди в

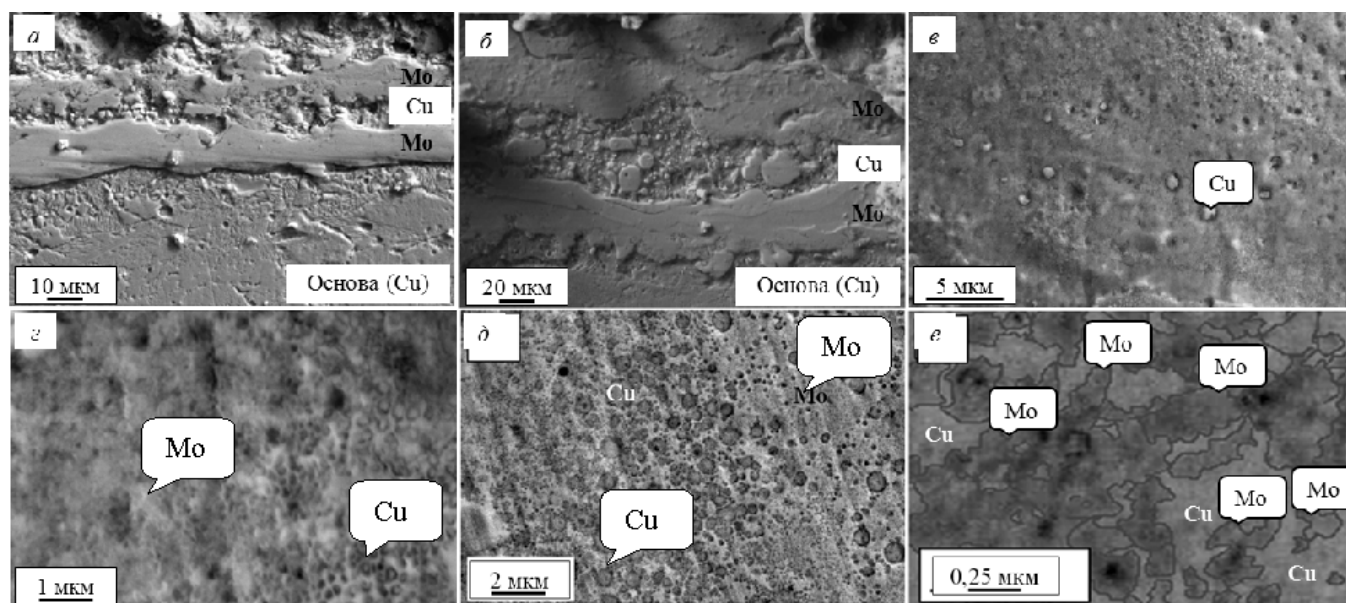


Рис. 1. Характерное изображение структуры композиционных покрытий Mo-Cu, сформированных с использованием фольг:

а, б – покрытие со слоистой структурой; в, г – покрытие с наполненной структурой при ЭВН в низкоинтенсивном режиме; д – покрытие с наполненной структурой при ЭВН в высокоинтенсивном режиме; е – зона смешивания молибдена и меди на границе покрытия с основой (Сканирующая электронная микроскопия. Прямые шлифы)

областях с развитым рельефом ниже, чем в областях с гладким рельефом. На основании этого можно считать, что области с гладким рельефом образованы преимущественно конденсированными частицами продуктов взрыва медной фольги, а области с грубым рельефом – продуктами порошков для ЭВН.

Определен комплекс характеристик топографии поверхности покрытий – параметры шероховатости Ra , $Rmax$, Sm [13]. Рельеф поверхности слоистых покрытий и покрытий с наполненной структурой имеет параметр шероховатости $Ra = 2,0 \dots 2,5$ мкм, $Rmax = 10,1 \dots 33,3$ мкм, $Sm = 40,1 \dots 50,2$ мкм. Наибольшие значения $Ra = 3,0 \dots 4,0$ мкм имеют покрытия системы Mo-Cu с наполненной нанокристаллической структурой.

При напылении слоистых покрытий с использованием фольг молибдена и меди (рис. 1, а, б) оказалось, что толщина единичных слоев пропорциональна массе фольги. При напылении единичных слоев покрытий их толщина достигала 0,14 мм, при последовательном напылении нескольких слоев максимальная толщина сформированных покрытий составляла 2 мм. На границах слоев меди и молибдена с основой вследствие термосилового воздействия плаз-

менной струи на поверхность, нагреваемую до температуры плавления, формируется волнообразный рельеф, который позволяет увеличить адгезию.

При увеличении поглощаемой плотности мощности воздействия на поверхность происходит искажение границ раздела поверхностного слоя с основой и между его отдельными слоями, а также разрушение слоистой структуры. При этом происходит формирование покрытий с наполненной структурой (рис. 1, в–д). В низкоинтенсивном режиме ЭВН, когда поглощаемая плотность мощности при обработке молибденового слоя продуктами взрыва медной фольги составляла $7,6 \text{ ГВт/м}^2$, в молибденовой матрице по всей толщине покрытия наблюдаются глобулярные включения меди размерами $30 \dots 200$ нм (рис. 1, з). Размер отдельных включений достигает 1 мкм.

При обработке образцов в высокоинтенсивном режиме ЭВН, когда поглощаемая плотность мощности превышала 10 ГВт/м^2 , при обработке молибденового слоя продуктами взрыва медной фольги формируются слои с композиционной наполненной структурой на основе молибдена и меди, в которой размер медных включений достигает 2 мкм (рис. 1, д). В этом случае они не выкрашиваются из матрицы, что способствует

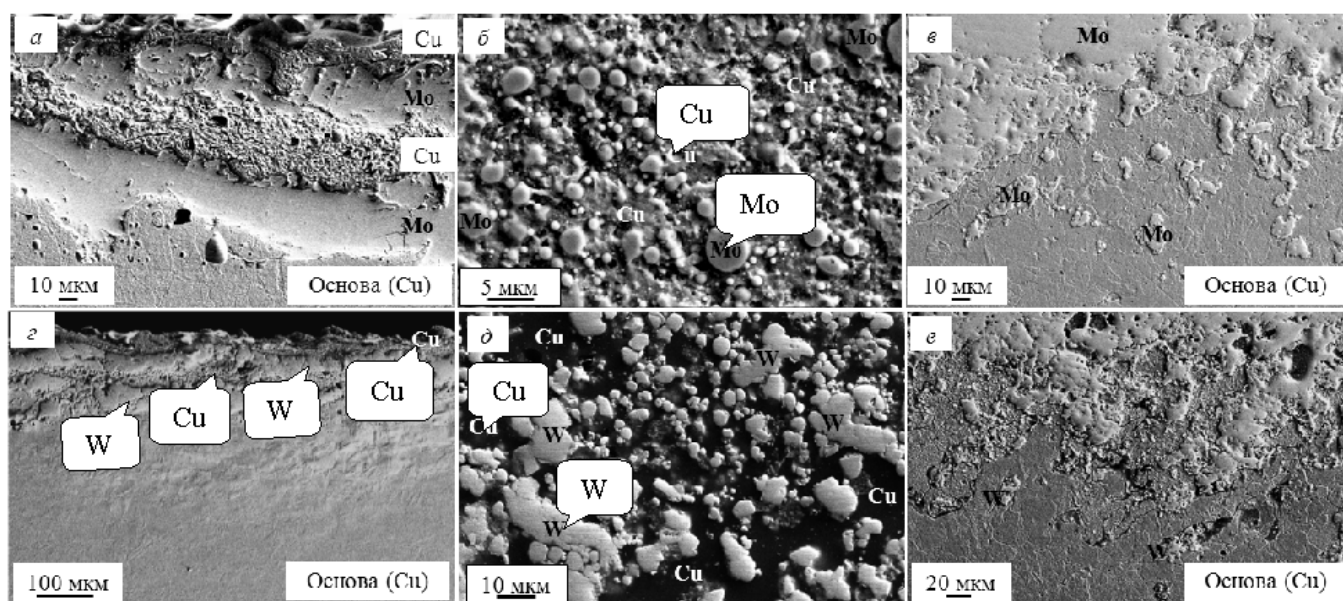


Рис. 2. Характерное изображение структуры покрытий:

а, б – покрытия системы Mo-Cu со слоистой и наполненной структурой соответственно (прямой шлиф); в, г – граница покрытия систем Mo-Cu и W-Cu с основой соответственно (косой шлиф); д, е – покрытия системы W-Cu со слоистой и наполненной структурой соответственно (прямой шлиф) (Сканирующая электронная микроскопия)

улучшению электроэрозионной стойкости поверхностных слоев. На границе покрытий с основой образуется зона смешивания молибдена и меди, в которой наблюдаются изолированные включения молибдена субмикронных размеров в медной матрице.

При увеличении поглощаемой плотности мощности при обработке предварительно напыленного молибденового слоя продуктами взрыва медной фольги формируется структура, образованная глобулярными включениями молибдена размерами около 2 мкм в медной матрице (рис. 2, б). Наблюдаются также субмикронные включения молибдена. В случае аналогичной обработки единичного слоя вольфрама формируется структура, образованная глобулярными включениями вольфрама размерами около 2 мкм в медной матрице (рис. 2, д).

При ЭВН покрытий со слоистой структурой с использованием медных фольг и порошков Мо (рис. 2, а) или W (рис. 2, г) граница покрытий с основой имеет особенности, аналогичные случаю ЭВН покрытий с использованием молибденовой фольги. Важной особенностью обработки является проникновение отдельных частиц вольфрама и молибдена в основу на глубину до нескольких микрометров (рис. 2, в, е).

При использовании электроконтактных композиционных покрытий систем W–Cu и Mo–Cu износостойкость в условиях сухого трения скольжения без смазки по сравнению с износостойкостью электротехнической меди марки М00 увеличивается в 1,7...2,2 раза. Электроэрозионная стойкость в условиях дуговой эрозии покрытий с наполненной структурой толщиной 25 мкм составляет около 10 000 циклов включений-выключений. Дополнительное повышение электроэрозионной стойкости покрытий достигается путем увеличения их толщины при повторном напылении единичных слоев. В процессе ускоренных испытаний на электроэрозионную стойкость в условиях искровой эрозии покрытия с композиционной наполненной структурой всех систем было выявлено ее увеличение примерно в 10 раз.

Закключение

Таким образом, разработан метод электро-взрывного напыления композиционных покрытий систем W–Cu и Mo–Cu со слоистой или на-

полненной микрокристаллической структурой. Определен комплекс характеристик топографии поверхности покрытий – параметры шероховатости: Ra , $Rmax$, Sm . При напылении единичных слоев покрытий их толщина достигает 140 мкм, при последовательном напылении нескольких слоев максимальная толщина сформированных покрытий составляет 2 мм. Толщина покрытий может регулироваться в широких пределах (до 2 мм) в зависимости от условий эксплуатации конкретной номенклатуры упрочняемых деталей. Износостойкость покрытий увеличивается до двух раз, а электроэрозионная стойкость в условиях искровой эрозии – до 10 раз по сравнению с электротехнической медью М00. Результаты работы могут быть использованы для упрочнения медных электрических контактов различной электротехнической аппаратуры.

Исследования выполнены в соответствии с Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.1154).

Список литературы

1. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // Успехи физ. наук. – 2005. – Т. 175. – № 5. – С. 515–544.
2. Иванов Л.И., Дедюрин А.И., Боровицкая И.В. и др. Ударное легирование металлов химически не взаимодействующими с ними элементами при помощи концентрированных импульсных потоков энергии // Перспективные материалы. – 2006. – № 5. – С. 79–83.
3. Иванов Л.И., Дедюрин А.И., Боровицкая И.В. и др. Взаимодействие свинца с железом под действием высокотемпературной импульсной плазмы // Перспективные материалы. – Спец. вып. сент. – 2007. – Т. 1. – С. 158–161.
4. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Электровзрывное напыление электроэрозионно-стойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионно-стойких покрытий методом электровзрывного напыления. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.
5. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 212 с.



6. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Будовских Е.А., и др. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. – Новокузнецк: «Интер-Кузбасс», 2012. – 435 с.

7. Автоматизированная электровзрывная установка для повышения эксплуатационных характеристик материалов / Ю.Д. Жмакин, Д.А. Романов, Е.А. Будовских и др. // Промышленная энергетика. – 2011. – № 6. – С. 22–25

8. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов: монография / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк, СибГИУ. – 2007. – 301 с.

9. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура электровзрывных композиционных поверхностных слоев системы молибден–медь // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 11. – С. 95–100.

10. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура композиционных поверхностных слоев систем W–Cu и Mo–Cu, сформированных электровзрывным способом // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 5. – С. 51–55.

11. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Рельеф поверхности и структура псевдосплавных покрытий системы молибден–медь, сформированных электровзрывным способом // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 10. – С. 19–21.

12. Опыт и перспективы использования электровзрывной установки ЭВУ 60/10 для модификации поверхности материалов / Д.А. Романов, Е.А. Будовских, Ю.Д. Жмакин, В.Е. Громов // Изв. вуз. Чер. металлургия. – 2011. – № 6. – С. 20–24

13. ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 14 с.

The structure and properties of the coating by means electrical explosive treatment

Romanov D.A., Olesjuk O.V., Budovskikh E.A.,
Gromov V.E., Krivezhenko D.S.

Developed a method electroexplosive spraying composite coatings systems W-Cu and Mo-Cu or with a layered or filled with microcrystalline structure. The complexes of characteristics of topography surface coatings were specified. Wear resistance of coatings increased to two times, and the electro-resistance in a spark erosion – up to 10 times the electrical copper M00.

Key words: electric explosion of conduction, electroerosion stability coating, pseudoalloy, roughness, microstructure, wear resistance, electroerosion stability.