

Электроконтактные покрытия системы Mo – C – Cu, полученные методом электровзрывного напыления

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

Методом электровзрывного напыления (ЭВН) сформированы электроконтактные покрытия, содержащие карбиды MoC, Mo₂C, Mo и Cu. Изучены рельеф поверхности, структура, фазовый состав полученных покрытий.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, покрытия системы Mo – C – Cu, фазовый состав, микроструктура, нанотвердость, шероховатость.

By methods of electroexplosive spray coating formed by electric-containing carbides MoC, Mo₂C, Mo and Cu. Studied topography, structure, phase composition and nanohardness formed coatings.

Keywords: electroexplosive spraying, coating of system Mo – C – Cu, phase composition, microstructure, roughness.

Введение

Одним из перспективных направлений развития методов электровзрывной обработки поверхности металлов и сплавов является разработка способов электровзрывного напыления (ЭВН) для повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы электротехнических контактных поверхностей. ЭВН — это метод нанесения упрочняющих покрытий из продуктов электрического взрыва фольги и порошковых навесок на поверхность материалов. Метод позволяет формировать покрытия с высокой адгезией и различной структурой. ЭВН без оплавления поверхности основы позволяет получать единичные слои из того или иного вещества, либо при многократном нанесении единичных слоев разных материалов — композиционные покрытия со слоистой структурой. ЭВН с оплавлением поверхности и перемешиванием наносимых материалов с материалом основы позволяет получать композиционные покрытия с наполненной структурой, когда в матрице одного металла расположены включения других фаз. В [1] показаны возможности ЭВН молибден-медных, вольфрам-медных покрытий с композиционной наполненной и слоистой структурой и титан-бор-медных покрытий с композиционной структурой. В ряде случаев электроконтактные по-

крытия помимо высокой электропроводности должны иметь достаточно высокие твердость и износостойкость по сравнению с контактной медью. Одним из покрытий, отвечающим этим требованиям, являются покрытия системы Mo – C – Cu [2].

Цель настоящей работы — создание электроконтактных покрытий системы Mo – C – Cu методом ЭВН, изучение топографии их поверхности, структуры, фазового состава.

Методика

ЭВН покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, которая описана в [3]. Она 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 [4].

Обработке подвергали образцы электротехнической меди М1 размером 20 × 30 × 2 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверх-

ность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности [4]. В данной работе она составляла 5,5 (режим 1), 6,5 (режим 2) и 7,6 ГВт/м² (режим 3) и обеспечивала оплавление поверхности образцов меди и перемешивание ее с молибденом и углеродом, взаимодействие молибдена и углерода с образованием карбидов молибдена при последующем отводе в объем медных образцов и кристаллизации с формированием наполненной структуры покрытия.

В отличие от [5] ЭВН проводили электровзрывом медного композиционного материала для нанесения покрытий в виде двуслойной фольги с заключенными в ней навесками порошков молибдена и графита, взятыми в стехиометрическом соотношении для формирования карбида MoC, обладающего самой высокой твердостью. Масса молибдена, графита и меди составляла 100, 10 и 110 мг.

Исследования топографии поверхности проводили с использованием оптического интерферометра Zygo NewView™ 7300, рентгеноструктурные исследования поверхности покрытий — с помощью рентгеновского диффрактометра ДРОН-2 в FeK_α-излучении, измерение нанотвердости — на приборе “Nano Hardness Tester”. Растровую электронную микроскопию (РЭМ) осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50. Перед микроскопическими исследованиями шлифы подвергали химическому травлению раствором: FeCl₃ — 3 г, HCl — 2,5 мл, C₂H₅OH — 100 мл. Массу медных фольг и навесок порошков определяли с помощью аналитических весов Shimadzu AUX 120.

Результаты и их обсуждение

Профилометрия показала, что при формировании композиционных слоев параметр шероховатости их поверхности R_a составляет 2,0, 2,4 и 2,6 мкм для режимов 1, 2 и 3. Увеличение параметра R_a покрытий с ростом поглощаемой плотности мощности обусловлено тем, что при этом происходит более интенсивное конвективное перемешивание расплава [4]. Для режима 2, параметр шероховатости для базовой поверхности $R_a = 2,4$ мкм (рис. 2а), а для базовой длины $R_a = 2,3$ мкм (рис. 1б, в). Единичный выступ профиля высотой 14,0 мкм (на профилограмме он один) и впадина глубиной 21,8 мкм обуславливают высокие значения наибольшей высоты профиля для базовой поверхности $R_{max} = 35,8$ мкм (рис. 1а) и для базовой длины $R_{max} = 17,2$ мкм (рис. 1б, в). Указанные параметры шероховатости не препятствует практическому

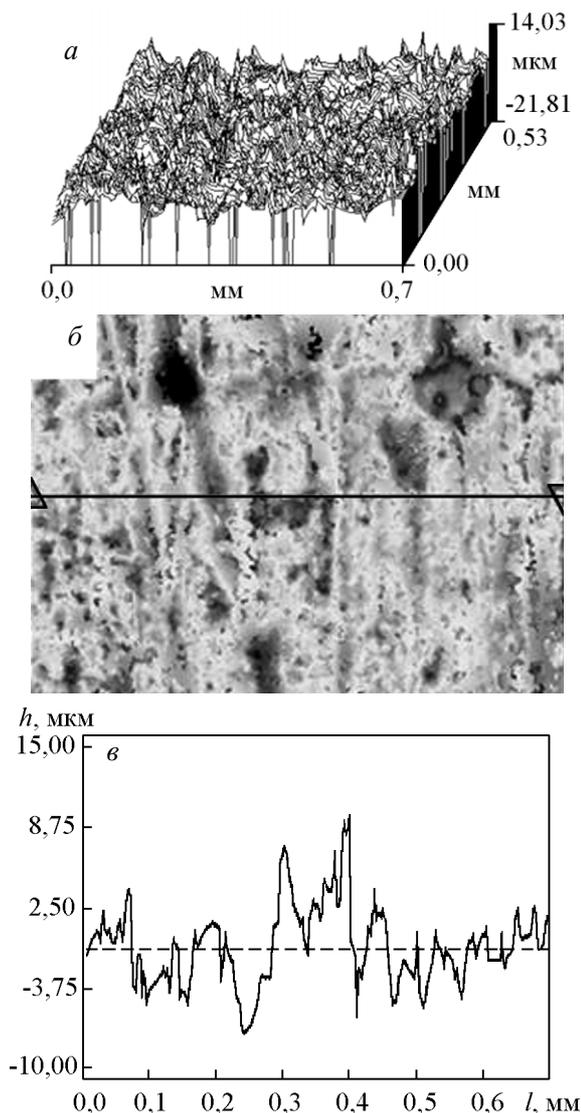


Рис. 1. Шероховатость поверхности, выявляемая методом оптической интерферометрии: а — распределение неровностей рельефа по высоте, б — положение секущей (вид сверху), в — распределение неровности вдоль базовой длины.

использованию ЭВН для упрочнения контактных поверхностей, поскольку известно [6], что при эксплуатации контактных поверхностей в неизменных условиях работы происходит приработка и создается стабильная шероховатость поверхности.

Методом РЭМ установлено, что после нанесения покрытий на их поверхности неравномерно распределены многочисленные деформированные закристаллизовавшиеся микрокапли диаметрами от 1 до 30 мкм, осевшие из тыла струи (рис. 2).

Исследования поперечных шлифов методом РЭМ показали, что в результате ЭВН на поверхности формируются покрытия толщиной 28 – 30 мкм. В

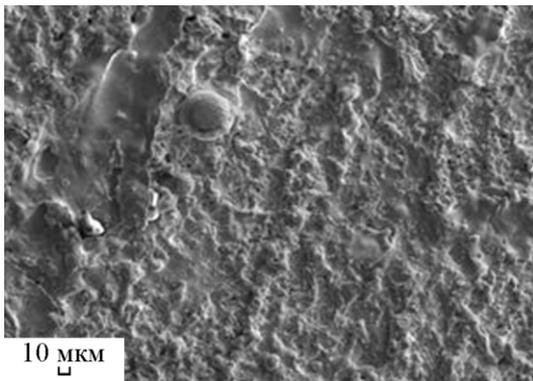
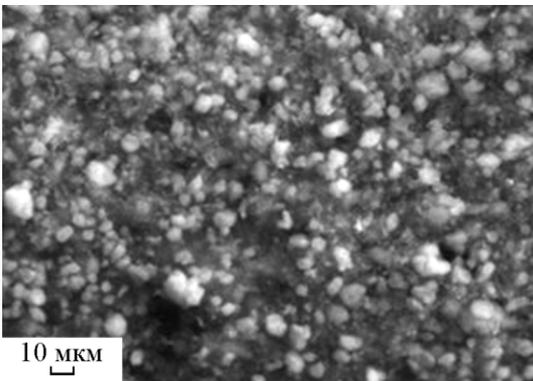
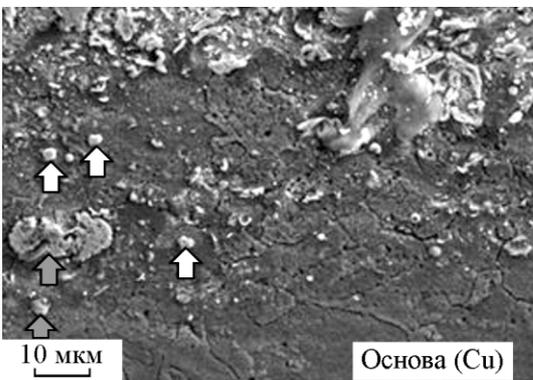


Рис. 2. Рельеф поверхности композиционных поверхностных слоев системы молибден – углерод – медь, сформированных в режиме 2.



a



б

Рис. 3. РЭМ покрытия: *a* – мелкодисперсная структура (прямой шлиф); *б* – зона взаимного смешивания молибдена, карбидов молибдена и меди на границе с медной основой (косой шлиф). Стрелками серого цвета на *б* показаны частицы молибдена, белого – карбидов молибдена.

медной матрице располагаются включения с размерами порядка 0,1 – 1,0 мкм (рис. 3*a*). На их границе с основой образуется зона взаимного смешивания молибдена, карбидов молибдена и меди. В этой зоне наблюдаются изолированные включения молибдена и карбидов молибдена микронных раз-

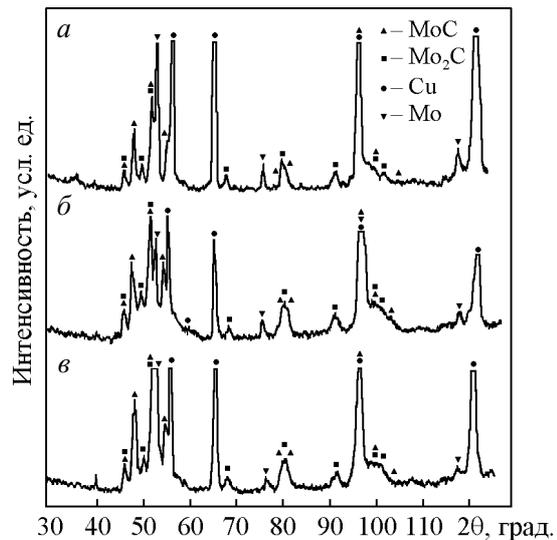


Рис. 4. Участки диффрактограмм поверхности после электровзрывного напыления в режимах 1 (*a*), 2 (*б*) и 3 (*в*).

меров в медной матрице (рис. 3*б*). Об этом свидетельствует результаты измерения нанотвердости. В местах включений она составляет 900 – 1100 HV, что соответствует нанотвердости карбидов молибдена, в то же время в некоторых областях ее значения достигают 320 HV, что соответствует микротвердости молибдена [7]. Условия электровзрывной обработки обеспечивают скорость частиц молибдена в интервале 0,5 – 2,5 км/с, а время воздействия на поверхность — 100 мкс. Значение локальной плотности напыляемых частиц порошков могло превышать 1 г/см³ [4]. Указанные параметры соответствуют области значений параметров, характерных для явления сверхглубокого проникания ускоренных взрывом микрочастиц в металлы [8]. Аналогичная структура при обработке поверхности алюминия импульсной плазменной струей магнитоплазменного ускорителя формировалась в [8, 9]. Нами аналогичная зона взаимного смешивания толщиной 1 – 3 мкм наблюдалась при обработке поверхности углеродистой стали 45 электровзрывом медной фольги, а также при обработке поверхности меди электровзрывом молибденовой фольги [10]. Это говорит о том, что механизм формирования псевдосплавов из несмешивающихся компонентов при ЭВН носит общий характер.

Рентгеноструктурные исследования показали, что во всех режимах обработки формируются покрытия, содержащие карбиды молибдена MoC, Mo₂C и псевдосплав Mo и Cu (рис. 4). С увеличением поглощаемой плотности мощности содержание молибдена в покрытиях уменьшается, а карбидов молибдена — увеличивается. Это согласуется с

известным представлением [4], согласно которому с увеличением поглощаемой плотности мощности увеличивается степень перемешивания компонентов струи с материалом основы, что создает более благоприятные условия для химического взаимодействия компонентов с образованием новых фаз.

Заключение

Сформированные композиционные покрытия системы Mo – C – Si с наполненной структурой имеют толщину 28 – 30 мкм, состоят из псевдосплава молибдена и меди с включениями карбидов MoC, Mo₂C с нанотвердостью до 1100 HV. Увеличение поглощаемой плотности мощности приводит к незначительному увеличению содержания карбидов. Шероховатость поверхности покрытий не превышает Ra = 2,6 мкм.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (гос. контракт № П332) и грантом РФФИ (проект № 10-07-00172-а).

Литература

1. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке. Под ред. В.Е. Громова. Новокузнецк: “Интер-Кузбасс”, 2011, 212 с.
2. Патент РФ № 2300446. Емельянов Е.Н., Довгаль О.В., Пузикова А.А., Куренкова О.В. Способ изготовления композиционного материала электротехнического назначения. Заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество “Дальневосточная технология” (ЗАО “ДВ-Технология”). № 2005121589/02; заявл. 08.07.2005; опубл. 10.06.2007, Бюл. № 16.
3. Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А. и др. Автоматизированная электровзрывная установка для повышения эксплуатационных характеристик материалов. Промышленная энергетика, 2011, № 6, с. 22 – 25.
4. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. Новокузнецк: СибГИУ, 2007, 301 с.
5. Романов Д.А., Жмакин Ю.Д., Будовских Е.А. и др. Формирование электроконтактных поверхностных слоев системы W – C – Si с использованием модернизированной электровзрывной установки ЭВУ 60/10М. Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2011, т. 8, № 2, с. 19 – 23.
6. Сафонов Л.И., Сафонов А.Л. Электрические угольные соединители. Трение и износ в контактных парах электрических соединителей. Технологии в электронной промышленности, 2003, № 8, с. 34 – 39.
7. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов: справочник. М.: Металлургия, 1987, 208 с.
8. Сивков А.А., Ильин А.П., Громов А.М. и др. Сверхглубокое проникание вещества высокоскоростного плазменного потока в металлическую преграду. Физика и химия обработки материалов, 2003, № 1, с. 42 – 48.
9. Сивков А.А. О возможном механизме “сверхглубокого проникания” микрочастиц в твердую преграду. Письма в журнал технической физики, 2001, т. 27, вып. 16, с. 59 – 64.
10. Романов Д.А. Формирование слоев электротехнического назначения на металлических контактных поверхностях электровзрывным способом. Образование, наука, инновации — вклад молодых исследователей: материалы V (XXXVII) Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 19 – 24 апреля 2010 г., Кемерово: ООО “ИНТ”, 2010, т. 2, вып. 11, с. 609 – 612.

Статья поступила в редакцию 10.10.2011 г.

***Романов Денис Анатольевич** — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), аспирант. Специализируется в области электровзрывной обработки поверхности. E-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru.*

***Будовских Евгений Александрович** — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), доктор технических наук, профессор кафедры физики. Специалист в области обработки поверхности концентрированными потоками энергии. E-mail: budovskih_ea@physics.sibsiu.ru.*

***Громов Виктор Евгеньевич** — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики. Специалист в области прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.*