

ские индексы квазиодномерного изинговского магнетика. Деп. в ВИНТИ Рег. №114-B2011 от 11.03.2011 г. – 22 с.

5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. V. Статистическая физика. Ч. I. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 616 с.

6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. X. Физическая кинетика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 536 с.

© 2013 г. М.Е. Шабунин, Е.В. Шабунина,
В.Н. Удодов

Поступила 26 ноября 2013 г.

УКД 621.785:669.1.08.29

**О.В. Олесюк¹, Д.А. Романов¹, Е.А. Будовских¹, С.В. Коновалов¹, В.Е. Громов¹,
Ю.Ф. Иванов^{2,3}, А.Д. Тересов²**

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет

СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ, ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Цель настоящей работы заключалась в анализе дефектной субструктуры модифицированных высокоинтенсивным электронным пучком электровзрывных композиционных покрытий, сформированных на поверхности меди.

Электровзрывное напыление покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М [1]. Покрытия наносили на медные электрические контакты командоконтроллера ККТ 61, площадь контактов 1,5 см². Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого проводника [1] для нанесения покрытий. В настоящей работе взрываемый проводник представлял собой двуслойную медную фольгу с заключенной в ней навеской порошков молибдена или молибдена и графита, вольфрама или вольфрама и графита, диборида титана. Поглощаемая плотность мощности при напылении составляла 4,1 ГВт/м², диаметр медного сопла – 20 мм, расстояние образца от среза сопла – 20 мм. Масса порошков молибдена, вольфрама и диборида титана составляла 272 мг каждого, графита – 27 мг, меди – 238 мг.

Модифицирование поверхности электровзрывных покрытий осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком, позволяющим переплавлять поверхностный слой толщиной до 50 мкм с последующим высокоскоростным охлаждением за счет отвода тепла в объем материала. Использовали установку «СОЛО» Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН [2]. Режимы электронно-пучковой обработки покрытий представлены ниже:

Состав покрытия	E_s , Дж/см ²	t , мкс	N , имп.
Mo – Cu	60	100	10
Mo – C – Cu	60	200	20
W – Cu	60	100	10
W – C – Cu	60	200	20
TiB ₂ – Cu	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.

Исследование морфологии структуры модифицированного слоя осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50. Анализ фазового состава и дефектной субструктуры поверхностного слоя

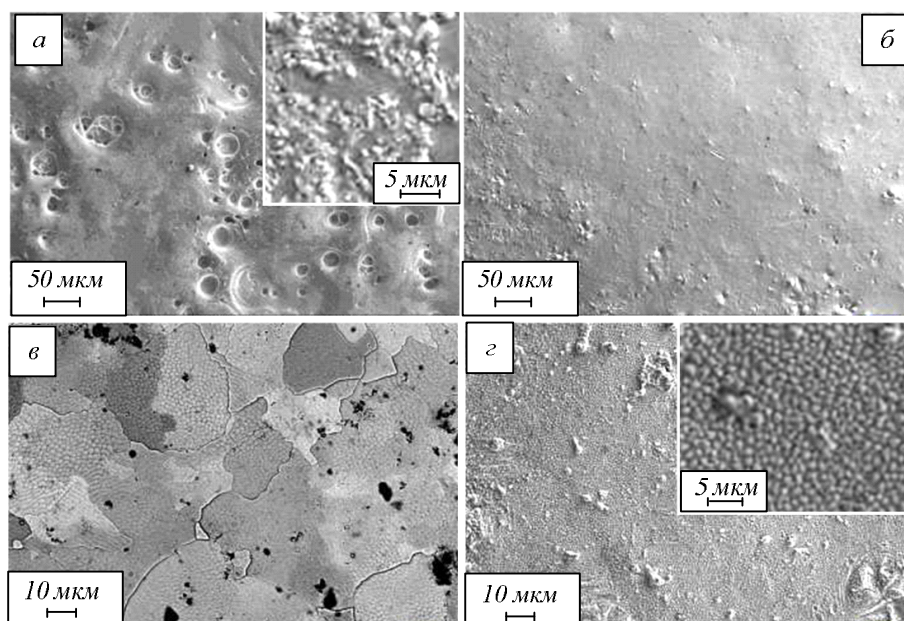


Рис. 1. Структура поверхности облучения покрытия состава W – Cu (а), TiB₂ – Cu (б, в) и Mo – Cu (г) высокоинтенсивным импульсным электронным пучком

покрытия, плавящегося при электронно-пучковой обработке, осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор ЭМ-125). Фольги готовили из пластинок, вырезанных параллельно поверхности покрытия и расположенных на расстоянии 25 – 30 мкм от поверхности облучения (в слое, модифицированном электронным пучком, как показали предварительно выполненные исследования структуры поперечных шлифов).

Обработка поверхности покрытий высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (независимо от элементного состава и режима облучения) сопровождается плавлением слоя толщиной 30 – 50 мкм; поверхность облучения выравнивается, исчезают микрокапли, микрократеры и микротрещины (рис. 1). Формируется поликристаллическая структура, размер зерен которой при плотности энергии пучка электронов 60 Дж/см² (при $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.) изменяется в пределах от 3 до 40 мкм. Увеличение длительности воздействия пучка электронов до 200 мкс (при $N = 20$ имп.) при этой же плотности энергии пучка электронов приводит к формированию более однородной зеренной структуры (размер зерен изменяется в пределах от 10 до 20 мкм). В объеме зерен (независимо от плотности энергии пучка электронов) наблюдается структура ячеистой кристаллизации, характерная для материала, охлажденного с высокими скоростями [3, 4]. Размер ячеек изменяется в пределах 0,25 – 0,50 мкм (рис. 1, г).

Электронно-микроскопические исследования тонких фольг, приготовленных из слоя покрытия, модифицированного высокоинтенсивным электронным пучком, выявили (независимо от фазового состава покрытия и режима облучения электронным пучком) следующие субструктуры: ячеистую, полосовую, фрагментированную, субзеренную, а также зерна с хаотически распределенными дислокациями и дислокациями, формирующими сетки. Характерные изображения этих структур представлены на рис. 2. Хаотически распределенные дислокации и дислокации, формирующие сетки, выявляются также и во всех указанных выше субструктурах. Увеличение длительности импульса воздействия пучка от 100 до 200 мкс и количества импульсов с 10 до 20 способствовало, преимущественно, формированию дислокационной субструктуры с более совершенными границами. Относительное содержание таких субструктур в исследуемых материалах представлено на рис. 3. Оценку осуществляли, определяя по микрофотографии относительную площадь поверхности, занимаемой той или иной субструктурой [5]. Анализируя результаты, представленные на рис. 3, можно отметить, что относительное содержание дислокационных субструктур зависит и от элементного состава покрытия, и от режима электронно-пучковой обработки. Однако преимущественным типом дислокационной субструктуры во всех покрытиях (исключая покрытие состава W – C – Cu) является полосовая.

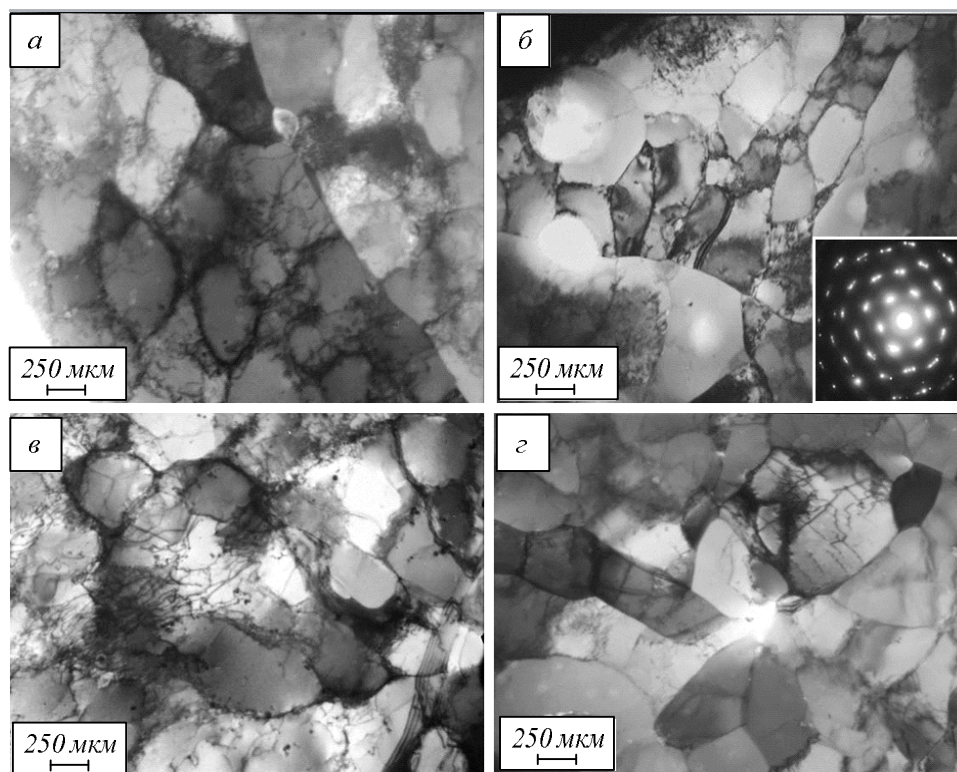


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение дислокационной ячеистой (а), полосовой (б), фрагментированной (в) и субзеренной (з) субструктуры, формирующейся в электровзрывных покрытиях составов Мо – С – Cu (а) и W – С – Cu (б – з), облученных высокоинтенсивным импульсным электронным пучком

Анализ микроэлектроннограмм, полученных при исследовании материала методами электронной микроскопии тонких фольг, позволяет определить его фазовый состав. Как и следовало ожидать, основной фазой исследуемых покрытий является твердый раствор на основе меди. В объеме зерен меди и на границах обнаруживаются частицы вторых фаз. В покрытиях составов Мо – Cu и W – Cu выявлены исключительно частицы молибдена и вольфрама соответственно. Этого следовало ожидать, так

как растворимость и молибдена, и вольфрама в меди практически равна нулю; фаз молибден и вольфрам с медью не образуют [6, 7].

Частицы имеют округлую форму, по размерам могут быть разделены на два класса. Во-первых, это частицы, размеры которых изменяются в пределах 80 – 150 нм. Можно предположить, что это частицы исходного порошка, не растворившиеся в процессе облучения. Во-вторых, частицы, размеры которых изменяются в пределах 10 – 15 нм. Очевидно, что частицы этого размерного диапазона выделились при кристаллизации расплава.

В покрытиях фазового состава TiB_2 – Cu выявлены (наряду с частицами TiB_2) частицы состава Ti_2B_5 , что может указывать на частичное растворение порошка диборида титана TiB_2 и его повторное выделение в составе Ti_2B_5 . В покрытиях составов Мо – С – Cu и W – С – Cu следовало ожидать формирования карбидной фазы. Действительно, выполненные исследования выявили частицы карбида молибдена состава Mo_2C (рис. 4) и карбида вольфрама состава WC (рис. 5). В обоих случаях размеры частиц карбидной фазы изменяются в пределах 10 – 30 нм.

Выводы. Выполнены электронно-микроскопические исследования покрытий, сформированных электровзрывным методом на образцах

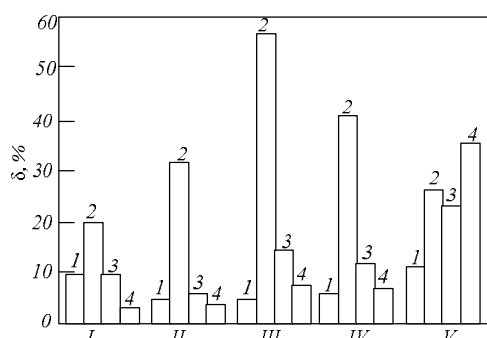


Рис. 3. Диаграмма субструктур, формирующихся в электровзрывных покрытиях составов Мо – Cu (I), W – Cu (II), TiB_2 – Cu (III), Мо – С – Cu (IV), W – С – Cu (V), облученных импульсным электронным пучком. Тип субструктуры: 1 – ячеистая; 2 – полосовая; 3 – фрагментированная; 4 – субзеренная (остальное – зерна со структурой дислокационного хаоса или сетчатой субструктурой)

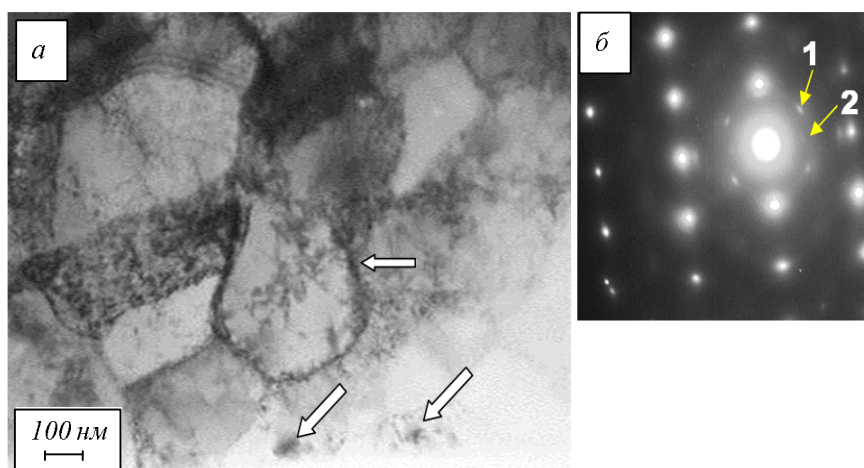


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры электровзрывного покрытия состава $\text{Mo} - \text{C} - \text{Cu}$, обработанного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (стрелками на (а) показаны частицы карбида Mo_2C ; на (б) – рефлексы [011] (1) и [001] (2) карбида Mo_2C):
а – светлое поле; б – микроэлектронограмма

меди и облученных высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Выявлено формирование многофазной высокодефектной структуры в поверхностном слое покрытия. Установлено, что в покрытиях составов $\text{Mo} - \text{Cu}$ и $\text{W} - \text{Cu}$ вторыми фазами являются наноразмерные частицы молибдена и вольфрама. В покрытиях составов $\text{Mo} - \text{C} - \text{Cu}$, $\text{W} - \text{C} - \text{Cu}$ и $\text{TiB}_2 - \text{Cu}$ выявлено формирование частиц вторых фаз – карбидов Mo_2C и WC , боридов титана Ti_2B_5 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Электровзрывное напыление электроэрозсионностойких покрытий:

формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозсионностойких покрытий методом электровзрывного напыления. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.

2. 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. Гл. 13. / Под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345 – 382.
3. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with

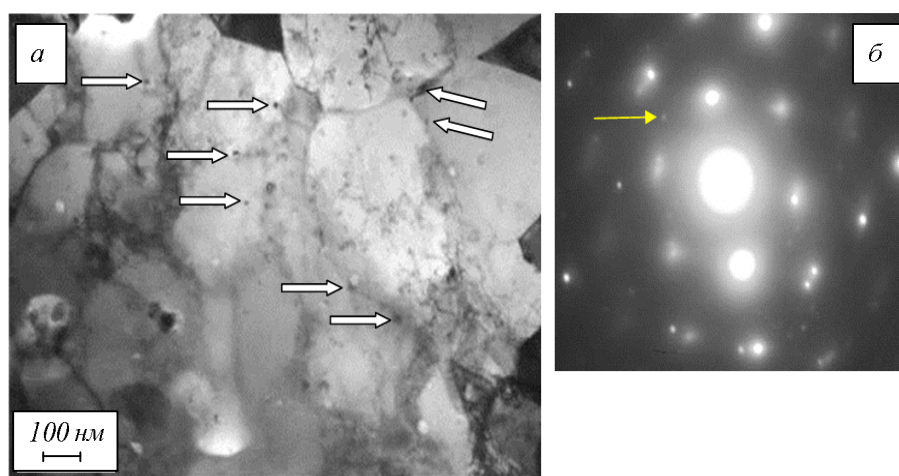


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры электровзрывного покрытия состава $\text{W} - \text{C} - \text{Cu}$, обработанного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (стрелками на (а) показаны частицы карбида WC ; на (б) – рефлекс [001] карбида WC):
а – светлое поле; б – микроэлектронограмма

- low-energy, high-current electron beams. Chapter 6 in Book «Materials surface processing by directed energy techniques» Ed. by Y. Pauleau, Elsevier, 2006. P. 205 – 240.
4. Г л е з е р А.М., Г р о м о в В.Е., И в а н о в Ю.Ф., Ш а р к е е в Ю.П. Наноматериалы: структура, свойства, применение. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 423 с.
 5. Ч е р н я в с к и й К.С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
 6. Сплавы молибдена / Н.Н. Могутнова, Б.А. Клыпин, В.А. Бояршинов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 392 с.
 7. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996 – 2000. Т. 1 – 3.

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

УДК 621.791:624

Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.В. Роор

Сибирский государственный индустриальный университет

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ ФЛЮС-ДОБАВКИ НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНОГО ШВА ОКСИДНЫМИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ*

При использовании флюсов некоторых марок не всегда обеспечиваются требуемые механические свойства металла сварного шва (в частности, ударная вязкость при пониженных температурах) в связи с образованием большого количества неметаллических включений. Большинство таких включений являются оксидными (независимо от того, экзогенные они или эндогенные). Содержание неметаллических включений в металле шва, в свою очередь, зависит от количества общего кислорода. Так как растворимость кислорода в твердом металле мала, то содержание общего кислорода характеризует уровень загрязненности неметаллическими включениями. При использовании существующих флюсов для сварки низколегированных сталей наблюдается повышенное содержание общего кислорода и, следовательно, повышенное количество неметаллических включений. В настоящее время снижение содержания неметаллических включений в металле сварных швов при автоматической сварке под флюсом достигается применением слабоокислительных флюсов, однако такие флюсы имеют неудовлетворительные сварочно-технологические свойства и редко применяются при сварке низколегированных сталей. В случае

использования окислительных флюсов металл шва насыщается кислородом в результате кремне- и марганцевосстановительных процессов.

В настоящее время при сварке применяются следующие системы легирования за счет кремнемарганцевосстановительных процессов: 1 – низкоуглеродистая электродная проволока и высокомарганцевистый флюс с высоким содержанием кремнезема; 2 – низкоуглеродистая проволока и высококремнистый (кислый) флюс; 3 – среднемарганцевистая электродная проволока и среднемарганцевистый кислый флюс. Эти системы имеют ряд недостатков:

– использование кремния и марганца в качестве раскислителей приводит к образованию различных оксидных включений, которые из-за скоротечности процесса сварки не всегда успевают всплыть и ассимилироваться шлаком, поэтому концентрация свободного и связанного кислорода в металле шва довольно высока. В связи с этим наблюдается понижение ударной вязкости металла шва, особенно при отрицательных температурах. Таким образом, оптимальным, с точки зрения исключения образования в металле сварного шва неметаллических включений, является использование углерода, так как образующиеся оксид и диоксид углерода находятся в газообразном состоянии, поэтому легко удаляются и не загряз-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации госзаказа 7.5021.2011.