УДК 621.785:669.1.08.29

# СТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ ТІС-Мо, полученных электровзрывным напылением\*

Д.А. РОМАНОВ, канд. техн. наук, ст. преподаватель О.В. ОЛЕСЮК, доцент Е.А. БУДОВСКИХ, доктор техн .наук, профессор Е.С. ВАЩУК, канд. техн. наук, ст. преподаватель В.Е. ГРОМОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор (СибГИУ, г. Новокузнецк)

> Поступила 24 мая 2013 года Рецензирование 10 июня 2013 года Принята к печати 14 июня 2013 года

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

Одним из перспективных методов повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей из металлов и сплавов является электровзрывное напыление (ЭВН), которое осуществляется с использованием электрического взрыва проводников. К его достоинствам относится возможность формирования покрытий, характеризующихся высокой адгезией с основой. В настоящей работе методами оптической интерферометрии и сканирующей электронной микроскопии изучены рельеф поверхности и особенности структуры электровзрывных покрытий системы TiC-Mo. Установлено, что параметр шероховатости покрытий Ra = 2,9...3,0 мкм. Толщина покрытий составляет 55...70 мкм. На границе покрытия с основой формируется рельеф, который позволяет увеличивать адгезию. Структура композиционных покрытий представляет собой молибденовую матрицу с включениями частиц карбида титана.

**Ключевые слова:** электровзрывное напыление, износостойкие покрытия, молибден, карбид титана, шероховатость, адгезия, микроструктура.

# Введение

Композиционные покрытия системы TiC-Mo обладают высокой износостойкостью и микротвердостью [1]. Формирование таких покрытий в настоящее время реализовано методом плазменного напыления в воздушной среде [1] и в вакууме [2]. Они используются в машиностроении для защиты деталей, испытывающих повышенные нагрузки при работе в агрессивных средах и высоких температурах, в частности, в поршневых системах двигателей внутреннего сгорания. Однако структура этих покрытий имеет такие недостатки, как пористость, которая ухудшает их теплопроводность, и низкая адгезия.

Одним из перспективных методов повышения эксплуатационных показателей и увеличения срока службы деталей из металлов и сплавов является электровзрывное напыление (ЭВН), которое осуществляется с использованием электрического взрыва проводников. К его достоинствам относится возможность формирования покрытий с высокой адгезией с основой [3]. Электровзрывное напыление 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. Электровзрывное напыление с оплавлением поверхности и перемешиванием слоев наносимых материалов друг с другом и с материалом основы позволяет получать композиционные покрытия с наполненной структурой, когда в матрице одного металла расположены включения других фаз.

Цель настоящей работы заключалась в создании методом ЭВН композиционных покрытий системы TiC-Mo, изучении топографии их поверхности и структуры.

<sup>\*</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-12009 офи\_м и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

# Материалы и методы исследования

ЭВН покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, которая описана в работе [4]. Она включает емкостный накопитель энергии и импульсный плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы электродов с размещенным на них проводником, разрядной камеры, локализующей 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.

Обработке подвергали образцы стали 45 в отожженном состоянии с размерами 20×30×2 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности [5]. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого ма-

# Результаты и обсуждение

Сканирующая электронная микроскопия показала, что на поверхности покрытий (рис. 1, a,  $\delta$ ) вследствие высокоскоростной кристаллизации образуются микротрещины. Хорошо различимы также многочисленные деформированные микрокапли диаметрами от 1 до 50 мкм, осевшие на ней из тыла струи [5].

Стрелками на рис. 1, *а*, *б* показаны микротрещины

Оптическая интерферометрия показала, что шероховатость поверхности покрытий характеризуется высокими значениями Ra = 2,9...3,0 мкм, что обусловлено получением покрытия при ЭВН, для которого характерно осаждение на поверхность преимущественно жидких частиц продуктов взрыва из тыла струи с последующей самозакалкой [3, 5].

Рентгеноспектральный микроанализ различных участков покрытия обнаружил (рис. 2), что область набора рентгеновского спектра I, выбранная на включении (светлые области округлой формы размером 0,1...5,0 мкм на рис. 1, a) образована титаном. Область спектра 2, выбранная на участке покрытия



*Рис. 1.* Морфология поверхности электровзрывного композиционного покрытия системы TiC-Mo: *a* – общий вид; *б* – микрокапли; *в* – композиционная структура микрокапли

териала (КЭВМ) для нанесения покрытий, который в данной работе представлял собой двуслойную молибденовую фольгу с заключенной в ней навеской порошка карбида титана. Поглощаемая плотность мощности при напылении составляла 4,5 ГВт/м<sup>2</sup>, диаметр молибденового сопла – 20 мм, расстояние образца от среза сопла – 20 мм. Массы фольги и порошковой навески составляли: 284 и 142 в режиме 1; 284, 213 в режиме 2; 284 мг в режиме 3.

Исследования топографии поверхности проводили с использованием оптического интерферометра Zygo NewViewTM 7300. Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50.





а – области набора рентгеновского спектра; б – рентгеновские спектры



*Рис. 3.* Композиционная наполненная структура покрытий системы TiC-Mo, напыленных в различных режимах. Прямые шлифы:

*а* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3

#### Выводы

без включений, – молибденом, спектров 3–5, выбранных на участках покрытия, образованных матрицей и включениями – молибденом и титаном в различном соотношении. Содержание титана и молибдена для спектров 3, 4 и 5 составляет 44 и 56, 52 и 48, 46 и 54 ат. % соответственно. На основании этих данных можно утверждать, что покрытие обладает композиционной наполненной структурой, представляющей собой молибденовую матрицу с расположенными в ней упрочняющими включениями карбида титана с размерами 0,1...8,0 мкм. Видно (рис. 3), что соотношение матрицы и упрочняющих включений составляет 2:1, 1,5:1 и 1:1 для режимов 1, 2 и 3 соответственно. Покрытия характеризуются отсутствием пористости.

Согласно данным СЭМ поперечных сечений покрытий их толщина равна 55...70 мкм (рис. 4). На границе покрытия с основой вследствие термосилового воздействия плазменной струи на поверхность основы, нагреваемую до температуры плавления, формируется рельеф, который позволяет увеличивать адгезию.



Рис. 4. Характерное изображение структуры покрытия системы TiC-Mo. Прямой шлиф

Впервые электровзрывным способом получены покрытия из молибдена и карбида титана, параметр шероховатости которых Ra = 2,9...3,0 мкм. Рельеф поверхности покрытий образован композиционными микрокаплями системы TiC-Mo диаметрами от 1 до 50 мкм. Толщина покрытий составляет 55...70 мкм. Граница покрытия с основой является неровной. Покрытие обладает композиционной наполненной структурой, представляющей собой молибденовую матрицу с расположенными в ней упрочняющими включениями карбида титана.

#### Список литературы

1. *Fukushima T*. High temperature properties of TiC/Mo coatings by thermal spraying //Journal of High Temperature Society. -2002. – Vol. 28. – No. 4. – P. 171 – 175.

2. Xiaoqian G., Yaran N., Liping H., Heng J., Xuebin Z. Microstructure and tribological property of TiC-Mo coating prepared by vacuum plazma spraying // Journal of Termal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21(5). – P. 1083 – 1089.

3. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления. – Saarbrucken: LAP LAM-BERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 170 с.

4. Жмакин Ю.Д., Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Автоматизированная электровзрывная установка для повышения эксплуатационных характеристик материалов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 6. – С. 22–25.

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

#### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

CM

Obrabotka metallov N 3 (60), July–September 2013, Pages 90-93

## Structure of wear resistant coatings TiC-Mo, received electric-explosive spraying

D.A. Romanov, O.V. Olesyuk, E.A. Budovskikh, E.S. Vaschuk, V.E. Gromov

Siberian State Industrial University, Kirov st., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia E-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru

#### Abstract

One of promising technique to increase the performance index and service life of details made of metal and alloys is electroexplosive spattering (EES), that is carried out by electrical explosion. One of this technique advantages is a high adhesion to the substrate of the formed coating. A topography and structural features of TiC-Mo electroexplosive coatings is studied in this work by methods of optical interferometry, and scanning electron microscopy. It is found that the after treatment surface roughness parameters are about  $Ra = 3,0 \mu m$ . The thickness of layers is about 55-70  $\mu m$ . A profile, forming on the border of a coating and a substrate, increases an adhesion. A structure of composite coatings is presented by molybdenum matrix with titanium carbide particles inside. Coatings have a cohesively-adhesive bond with the material contact surfaces.

Keywords: electroexplosive spraying; wear-resistant coatings; molybdenum; titanium carbide; roughness; adhesion; microstructure.

# References

1. Fukushima T. Journal of High Temperature Society, 2002, Vol. 28, no. 4, pp. 171 – 175.

2. Xiaoqian G., Yaran N., Liping H., Heng J., Xuebin Z. Journal of Termal Spray Technology, 2012, Vol. 21(5), pp. 1083 – 1089.

3. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Jelektrovzryvnoe napylenie jelektrojerozionnostojkih pokrytij: formirovanie struktury, fazovogo sostava i svojstv jelektrojerozionnostojkih pokrytij metodom jelektrovzryvnogo napylenija (Electro-detonation spraying of electro-erosion-resistant coatings: structure formation, phase composition and properties of electro-erosion-resistant coatings by electro-detonation spraying), Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 170 p.

4. Zhmakin Ju.D., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Kuznecov V.A. *Promyshlennaja jenergetika*, 2011, no. 6, pp. 22–25.

5. Bagautdinov A.Ja., Budovskikh E.A., Ivanov Ju.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy jelektrovzryvnogo legirovanija metallov i splavov* (Physical basis of Electro-detonation doping metals and alloys). Novokuznetsk, SibSIU, 2007. 301 p.