

УДК 620.198:533.9 (045)

А. П. УМАНСКИЙ<sup>1</sup>, М. С. СТОРОЖЕНКО<sup>2</sup>, А. Е. ТЕРЕНТЬЕВ<sup>1</sup>, В. В. АКОПЯН<sup>1</sup><sup>1</sup> *Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН, Киев, Украина*<sup>2</sup> *Национальный авиационный университет, Киев***ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ TiB<sub>2</sub>-(Fe-Mo)**

*В работе исследовано структурно-фазовый состав и износостойкость плазменных покрытий системы TiB<sub>2</sub>-(Fe-Mo). Методами порошковой металлургии получены композиционные порошки ТБФМ системы TiB<sub>2</sub>-(Fe-13мас.%Mo) с 20, 40, 60 и 80 мас.% сплава Fe-13мас.%Mo. Полученные порошки являются конгломератами, содержащими как тугоплавкую, так и металлическую фазы. При плазменном напылении таких порошков формируется покрытие с гетерофазной структурой, в которой зерна диборида титана распределены в матрице на основе железа. Представлены результаты триботехнических испытаний полученных покрытий в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения без смазки.*

**Ключевые слова:** плазменное напыление, покрытие, диборид титана, структура, микротвердость, износостойкость

**Введение**

В процессе эксплуатации детали газотурбинных двигателей подвергаются различным видам изнашивания, что приводит к снижению их работоспособности [1-4]. Поэтому актуальной задачей двигателестроения является увеличение износостойкости поверхностного слоя деталей.

Для поверхностного упрочнения рабочих поверхностей деталей газотурбинных двигателей в настоящее время широко используют газотермические покрытия [2]. Методы газотермического напыления защитных покрытий характеризуются высокой продуктивностью, возможностью нанесения покрытий на детали различной формы и получения покрытий различной толщины [5-6]. К технологиям газотермического нанесения покрытий относят плазменное, высокоскоростное газопламенное и детонационное напыление, которые отличаются друг от друга видом энергии нагрева частиц и состава газовой струи.

Получение высоких эксплуатационных характеристик обрабатываемой поверхности возможно при условии выбора подходящего материала и оптимизации параметров его напыления, что требует изучения фазово-структурного состава и свойств полученных покрытий.

Для нанесения износостойких покрытий перспективными являются композиционные материалы на основе тугоплавких соединений титана, которые обладают малой удельной плотностью, высокой твердостью и температурой плавления. Для повышения пластичности и адгезии покрытий тугоплав-

кие соединения титана используют в комплексе с металлической связкой.

Исследованию структуры, физико-механических и триботехнических свойств газотермических покрытий из композиционных материалов на основе карбида и борида титана посвящены работы [7-12]. В работах [7-9] изучены особенности формирования структуры и свойства HVOF-покрытий из композиционных порошковых материалов системы NiCr-TiB<sub>2</sub> и FeCr-TiC, полученных методом высокотемпературного самораспространяющегося синтеза. Структура полученных покрытий состоит из зерен тугоплавкой и металлической фаз. Выявлено, что в условиях абразивного изнашивания полученные газотермические покрытия системы NiCr-TiB<sub>2</sub> и FeCr-TiC по уровню износостойкости превосходят покрытия из промышленных порошков Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr и Wc-Co.

В работе [10] исследовано формирование структуры плазменных покрытий TiB<sub>2</sub>-Ni из композиционных порошков, полученных методом конгломерирования и высокотемпературного синтеза. Авторами работы установлено, что в структуре покрытий TiB<sub>2</sub>-Ni присутствуют фазы TiB<sub>2</sub>, Ni, Ni<sub>20</sub>Ti<sub>3</sub>B<sub>6</sub>. Выявлено, что износостойкость полученных плазменных покрытий TiB<sub>2</sub>-Ni в условиях трения скольжения определяется соотношением тугоплавкой и металлической фаз. При этом наличие в структуре фазы Ni<sub>20</sub>Ti<sub>3</sub>B<sub>6</sub> является основным фактором, который определяет хрупкое разрушение покрытий во время триботехнических испытаний.

В работе [11] порошки системы TiB<sub>2</sub>-Ni для напыления HVOF-покрытий получены методом механи-

ческого легирования. Структура HVOF-покрытий  $TiB_2$ -40%Ni и  $TiB_2$ -50%Ni состоит из никеля и зерен диборида титана, при этом не обнаружено фазы  $Ni_{20}Ti_3B_6$ . Установлено, что на микроструктуру и свойства полученных покрытий влияет количество металлической фазы.

В работе [12] исследовано структуру и свойства плазменных покрытий из композиционных порошков системы TiCrC-FeCr. Порошки для напыления получены методом спекания исходной механической смеси порошков и последующего дробления полученных композитов. Установлено, что покрытия из разработанных порошков системы TiCrC-FeCr характеризуются гетерофазной структурой с равномерным распределением компонентов, что обеспечивает высокие триботехнические свойства покрытий в условиях трения скольжения без смазки.

В Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины разработаны износостойкие композиционные материалы ТБФМ системы  $TiB_2$ -(Fe-13 мас.%Mo) [13,14]. Структура разработанных материалов ТБФМ состоит из зерен диборида титана, сложных боридов титана-молибдена-железа и металлической фазы на основе железа. Композиционные материалы ТБФМ характеризуются высоким уровнем износостойкости в условиях трения скольжения и абразивного изнашивания. Однако более рационально и экономически выгодно использовать разработанные материалы в качестве защитных покрытий для стальных деталей. В работе [15] исследованы особенности формирования структурно-фазового состава и износостойкость электроискровых покрытий из электродов ТБФМ. Установлено, что с увеличением содержания (Fe-Mo) в материале электрода ТБФМ улучшается технологичность процесса электроискрового легирования, но при этом уменьшается износостойкость полученных ЭИЛ-покрытий в условиях абразивного изнашивания. Выявлено, что отдельные конгломераты в структуре ЭИЛ-покрытия ТБФМ20 являются препятствием для внедрения и перемещения абразивных частиц, что обеспечивает высокую износостойкость упрочненного слоя. Работа [16] посвящена исследованию детонационных покрытий из композиционных порошков системы  $TiB_2$ -(Fe-Mo). Выявлено, что при детонационном напылении полученных композиционных порошков не происходит разделения компонентов, что способствует образованию равномерной мелкодисперсной структуры покрытий, подобной структуре композиционных материалов ТБФМ. Выявлено, что в условиях абразивного изнашивания наибольшими значениями износа характеризуются детонационные покрытия из композиционного материала ТБФМ20, что объясняется хрупкостью покрытия из-за недостаточного содержания металлической фазы.

Таким образом, на формирование структурно-фазового состава и износостойкость газотермических покрытий из композиционных материалов на основе тугоплавких соединений титана влияет не только фазовый состав исходных материалов, а и способ получения порошков для напыления и метод нанесения покрытий. Цель данной работы – исследовать закономерности формирования структурно-фазового состава и триботехнических свойств плазменных покрытий из композиционных порошков системы  $TiB_2$ -(Fe-13мас.%Mo).

## Экспериментальная часть

Для напыления плазменных покрытий использовали разработанные композиционные порошки системы  $TiB_2$ -(Fe-13% мас.Мо) с содержанием металлической фазы 20, 40, 60, 80 мас.% (ТБФМ20, ТБФМ40, ТБФМ60, ТБФМ80 соответственно). В качестве исходных материалов для получения композиционных порошков использовали промышленный порошок диборида титана (ТУ6-09-03-7-7,5), порошок железа (ГОСТ 9879-74) и порошок молибдена (ТУ 48-19-316-80). Для получения композиционных порошков ТБФМ исходные компоненты смешивали в нужной пропорции и размалывали в планетарной мельнице со стальными шарами в среде ацетона. Полученную шихту брикетировали и спекали в вакууме в печи СШВЛ при температуре 1450-1500°C. Полученные спеки измельчали и просеивали через набор сит, отбирая фракцию (-100+63) мкм.

Плазменные покрытия наносили на подложки из стали 30ХГСА, используя плазменную установку УПУ-3Д-М с камерой-манипулятором 15ВБ. В качестве плазменного генератора использовался плазмотрон мощностью 55 кВт.

Поверхность подложки предварительно подвергали струйно-абразивной обработке. Для увеличения адгезионной связи материала покрытия с подложкой использовали промежуточный слой из терморезирующего материала ПТЮ5Н. Оптимальные режимы напыления разработанных порошков: ток  $I=500-550A$ , напряжение  $U=60-70B$ , дистанция напыления  $L=150-160mm$ .

Структуру и фазовый состав композиционных материалов, порошков и покрытий изучено на растровом электронном микроскопе РЭМ-106.

Для определения износостойкости покрытий системы  $TiB_2$ -(Fe-13%мас.Мо) в условиях абразивного изнашивания проведены триботехнические испытания разработанных покрытий на лабораторной установке при трении образцов в абразивной массе (песке). Разработанные плазменные покрытия также исследованы в условиях трения скольжения без смазки на машине трения МТ-68. Трибоиспыта-

ния проведены при скорости  $v=8\text{ м/с}$ , при нагрузке  $P=2\text{ МПа}$ , в качестве контртела использована сталь 65Г.

### Анализ полученных результатов

Полученные порошки являются конгломератами неправильной формы, содержащими как тугоплавкую, так и металлическую фазы (рис. 1). По данным микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) структура порошка ТБФМ состоит из зерен диборида титана (рис. 1, Спектр 1), включений сложного бориды молибдена-титана-железа (рис. 1, Спектр 3), а также металлическую фазу на основе железа (рис. 1, Спектр 2).

С увеличением содержания металлической фазы уменьшается содержанием диборида титана и увеличивается количество включений сложных боридов молибдена-титана-железа. Количество мо-

либдена в металлической фазе на основе железа составляет 2-5мас.%, что значительно меньше по сравнению с исходным составом сплава.

При напылении таких порошков не происходит разделение компонентов из-за разного удельного веса и скорости, что способствует получению равномерной структуры газотермических покрытий. Плазменные покрытия системы представляют собой гетерофазный материал с характерной ламельной структурой (рис. 2). По данным микрорентгеноспектрального анализа структура плазменных покрытий ТБФМ преимущественно состоит из зерен диборида титана (рис. 2, табл. 1, Спектр 1) и металлической фазы, которая представляет собой твердый раствор молибдена в железе (рис. 2, табл. 1, Спектр 2). В структуре плазменных покрытий ТБФМ не наблюдается включений сложных боридов молибдена-титана-железа, которые присутствуют в структуре композиционных материалов и порошков ТБФМ. При этом в структуре плазменных покрытий были

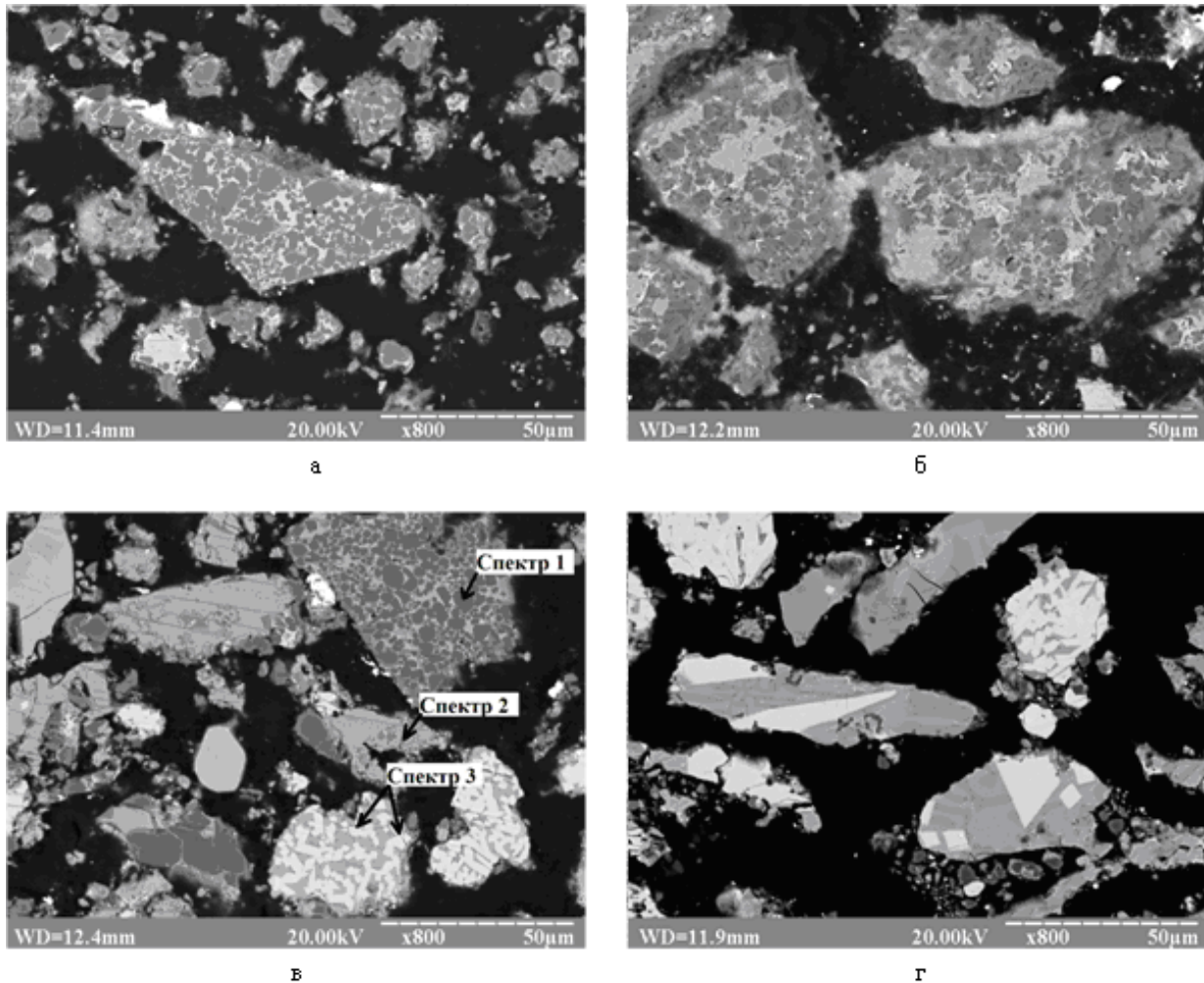


Рис. 1. Микроструктура композиционных порошков системы  $\text{TiB}_2\text{-(Fe-13мас.\%Mo)}$ : а – ТБФМ 20; б – ТБФМ 40; в – ТБФМ 60; г – ТБФМ 80

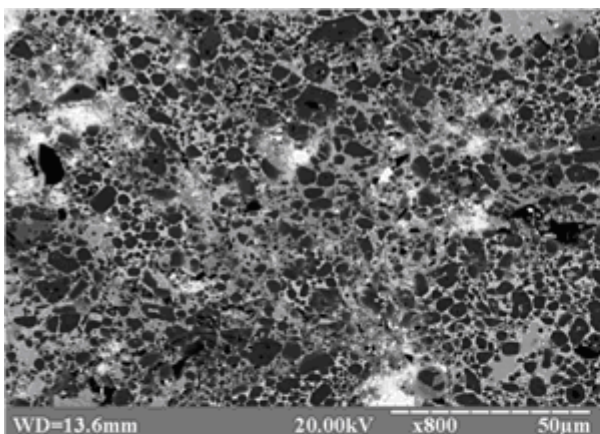
обнаружены немногочисленные включения фазы на основе молибдена (рис. 2, табл. 1, Спектр 3) и фазы на основе железа (рис. 2, табл. 1, Спектр 4).

В работе исследовано влияние соотношения тугоплавкой и металлической фаз на износостойкость полученных покрытий в условиях абразивного изнашивания и терния скольжения без смазки. Результаты триботехнических испытаний представлены на рис. 3.

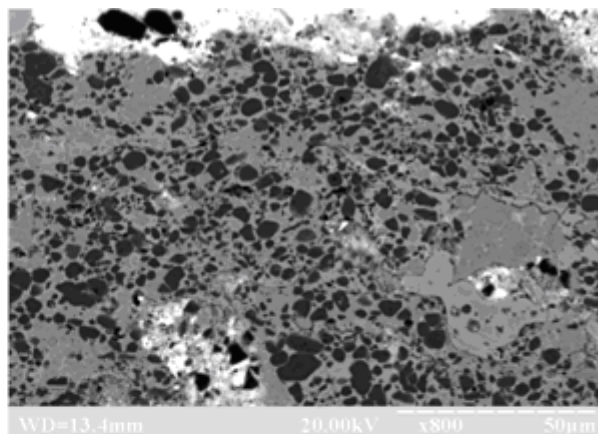
Таблица 1

Микрорентгеноспектральный анализ структуры плазменных покрытий системы  $TiB_2$ -(Fe-13мас.%Mo) (см. рис. 2)

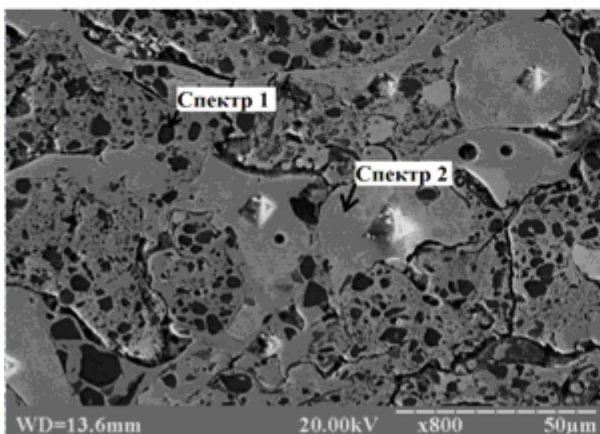
	Концентрация элементов, масс.%		
	Ti	Fe	Mo
Спектр 1	98,39	1,61	0,0
Спектр 2	0,44	99,01	0,56
Спектр 3	6,69	31,99	61,32
Спектр 4	4,02	57,50	38,49



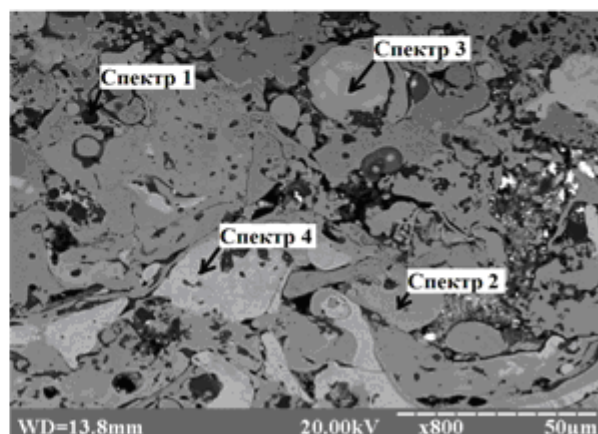
а



б



в



г

Рис. 2. Микроструктура плазменных покрытий системы  $TiB_2$ -(Fe-13мас.%Mo): а – ТБФМ 20; б – ТБФМ 40; в – ТБФМ 60; г – ТБФМ 80

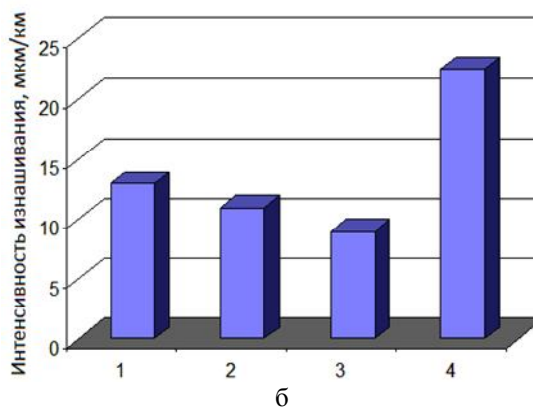
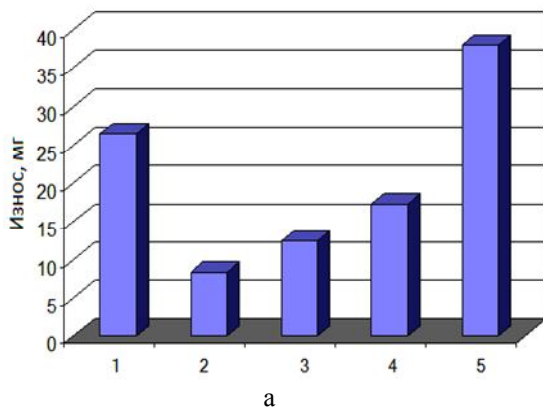


Рис. 3. Результаты триботехнических испытаний плазменных покрытий системы: а – в условиях абразивного изнашивания; б – в условиях терния скольжения без смазки; 1 – ТБФМ 20; 2 – ТБФМ 40; 3 – ТБФМ 60; 4 – ТБФМ 80

Наибольшими значениями износа характеризуются плазменные покрытия из композиционного материала ТБФМ20. Вероятно, это связано с тем, что в структуре покрытий недостаточно металлической связи, что приводит к его хрупкости и интенсивному выкрашиванию отдельных зерен боридов при соударении с абразивными частицами в условиях абразивного изнашивания или с контртелом в условиях трения скольжения без смазки.

Газотермические покрытия ТБФМ40 имеют наименьшие значения износа. С одной стороны, покрытия ТБФМ40 содержат значительное количество твердых зерен боридов, а с другой стороны - количество металлической фазы достаточно для того, чтобы удерживать зерна тугоплавкой фазы в структуре покрытия. С дальнейшим увеличением количества металлической фазы в структуре плазменных покрытий ТБФМ возрастает их износ.

### Выводы

В работе получены плазменные покрытия из композиционных порошков ТБФМ системы  $TiB_2$ -(Fe-13мас.%Mo) с 20, 40, 60, 80 мас.% металлической фазы. При плазменном напылении таких порошков на сталь формируется гетерофазная структура, которая состоит из металлической фазы на основе железа и зерен диборида титана. Выявлено, что в условиях абразивного изнашивания и трения скольжения без смазки плазменное покрытие ТБФМ40 характеризуется высокой износостойкостью, что обеспечивается достаточным содержанием металлической фазы в структуре покрытия.

Таким образом, плазменное покрытие ТБФМ может быть рекомендовано для упрочнения деталей, которые повреждаются в условиях абразивного изнашивания или трения скольжения.

### Литература

1. Кудрін, А. П. Особливості руйнування деталей вузлів тертя авіаційної техніки в процесі її експлуатації [Текст] / А. П. Кудрін, В. В. Жигинас // Проблеми тертя та зношування : наук. техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 63-71.
2. Анализ причин потери работоспособности деталей трущихся узлов авиатехники и методов их восстановления [Текст] / В. Ф. Лабунец, А. П. Кудрін, В. В. Жигинас, О. С. Супрунович, В. А. Тит, А. В. Мельник // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2009. – Вип. 51. – С. 86–96.
3. Крылов, К. А. Долговечность узлов трения самолетов [Текст] / К. А. Крылов, М. Е. Хаймзон. – М. : Транспорт, 1976. – 184 с.
4. Аксенов, А. Ф. Износостойкость авиационных топливно-гидравлических агрегатов [Текст] /

А. Ф. Аксенов, В. Н. Лозовский. – М. : Транспорт, 1986. – 240 с.

5. Газотермические покрытия из порошковых материалов [Текст] : справ. / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. А. Сидоренко, Е. Н. Арбатова. – К. : Техніка, 1987. – 544 с.

6. Pavlowski, L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* [Text] / L. Pavlovski. – Chichester : John Wiley & Sons, 2008. – 626 p.

7. *Thermally sprayed Ni(Cr)-TiB<sub>2</sub> coatings using powder produced by self-propagating high temperature synthesis: microstructure and abrasive wear behaviour* [Text] / A. J. Horlock, D. G. McCartney, P. H. Shipway, J. V. Wood. // *Material Science and Engineering*. – 2002. – P. 88-98.

8. *Comparison of the abrasive wear behaviour of HVOF sprayed titanium carbide- and titanium boride-based cermet coatings* [Text] / M. Jones, A. J. Horlock, P. H. Shipway, D. G. McCartney // *Wear*. – 2002. – № 1. – P. 1009-1016.

9. *Microstructure and abrasive wear behaviour of FeCr-TiC coatings deposited by HVOF spraying of SHS powders* [Text] / M. Jones, A. J. Horlock, P. H. Shipway, D. G. McCartney, J. V. Wood // *Wear*. – 2001. – Vol. 249. – P. 246-253.

10. *Microstructure and Sliding Wear Performance of Plasma-Sprayed TiB<sub>2</sub>-Ni Coating Deposited from Agglomerated and Sintered Powder* [Text] / Hong-Bin Zhu, Hui Li, Hai-Xin Yang, Zhuo-Xin Li. // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2001. – Vol. 22. – P. 1310-1319.

11. *Influence of binder phase content on the microstructure and properties of HVOF-sprayed TiB<sub>2</sub>-Ni coatings* [Text] / Ch. Xiao, Wang Hong-tao, Ji Gang-chang, Bai Xiao-bo, Wang Yu-wei // *Journal of Material Engineering*. – 2014. – № 3. – P. 34-40.

12. Структура и свойства плазменных покрытий из композиционных порошковых сплавов системы TiCrC-FeCr [Текст] / А. П. Уманский, В. П. Коновал, А. Д. Панасюк, И. А. Подчерняева и др. // Порошковая металлургия. – 2007. – № 3(4). – С. 37-45.

13. *Development of TiB<sub>2</sub>-based cermets with Fe-Mo binder* [Text] / A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, V. Akopyan. // *Key Engineering Materials*. – 2013. – Vol. 527. – P. 9-13.

14. Пат. №78156, МПК С22С 29/14. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану [Текст] / О. П. Уманський, В. В. Акоюн, М. С. Стороженко, І. М. Закієв, О. Д. Костенко ; заявник і власник Інститут проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України. – № у 201210411 ; заявл. 03.09.2012 ; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

15. Электроискровое упрочнение стали композиционными материалами системы  $TiB_2$ -(Fe-Mo) [Текст] / А. П. Уманский, М. С. Стороженко, В. В. Акоюн, И. С. Марценюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9(96). – С. 214-219.

16. Структура и свойства детонационных покрытий из композиционных порошков системы  $TiB_2$ -(Fe-Mo) [Текст] / А. П. Уманский, В. В. Акопян, М. С. Стороженко, А. А. Бондаренко и др. // Наукові нотатки. – Луцьк. – 2013. – Вып. 41 – С. 247-253.

Поступила в редакцию 10.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А. Д. Панасюк, институт проблем материаловедения НАНУ, Киев.

### ПЛАЗМОВІ ПОКРИТТЯ СИСТЕМИ $TiB_2$ -(Fe-Mo)

**О. П. Уманський, М. С. Стороженко, О. Є. Терентьев, В. В. Акопян**

В роботі досліджено структурно-фазовий склад та зносостійкість плазмових покриттів системи  $TiB_2$ -(Fe-Mo). Методами порошкової металургії отримано композиційні порошки ТБФМ системи  $TiB_2$ -(Fe-13мас.%Mo) з 20, 40, 60 і 80 мас.% сплаву Fe-13 мас.%Mo. Розроблені порошки є конгломератами, що містять як тугоплавку, так і металеву фази. При плазмовому напилюванні таких порошкових матеріалів формується покриття з рівномірною гетерофазною структурою, в якій зерна дибориду титану розподілені в металевому сплаві на основі заліза. Представлено результати триботехнічних випробувань отриманих покриттів в умовах абразивного зношування та тертя ковзання без мастила.

**Ключові слова:** плазмове напилювання, покриття, диборид титану, структура, зносостійкість.

### PLASMA-SPRAYED COATINGS OF $TiB_2$ -(Fe-Mo) SYSTEM

**A. P. Umanskyi, M. S. Storozhenko, A. E. Terentjev, V. V. Akopian**

The article is devoted to the investigation of structure and wear-resistance of plasma-sprayed coatings of  $TiB_2$ -(Fe-Mo) system. Composite powders of  $TiB_2$ -(Fe-13 мас.%Mo) system with 20, 40, 60 і 80 wt.% of metal phase content were obtained by powder metallurgy techniques. The developed powders are conglomerates, that contain both refractory compounds and metal phase. The plasma-sprayed coatings of  $TiB_2$ -(Fe-13 мас.%Mo) system have heterogeneous structure which consists of the titanium diboride grains distributed in iron-based matrix. Wear-resistance of the plasma-sprayed coatings was determined in abrasive medium and under dry sliding conditions.

**Key words:** plasma spraying, coating, titanium diboride, structure, wear-resistance.

**Уманський Александр Павлович** – д-р техн. наук, вед. науч. сотр., институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН, Киев, Украина, kermet@voliacable.com.

**Стороженко Марина Сергеевна** - канд. техн. наук, доцент кафедры технологий аэропортов, Аэрокосмический институт, Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: storozhenkomary@ukr.net.

**Терентьев Александр Евгеньевич** – науч. сотрудник 49 отдела, институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН, Киев, Украина.

**Акопян Владимир Вячеславович** – мл. науч. сотр., институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН, Киев, Украина.