



УДК 621.793.7:621.762

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-27-34



Оригинальная статья

Original article

НАПЫЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАКИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ TiB_2/Ti и HfB_2/Ti

М. Е. Гошкодеря¹ , Т. И. Бобкова¹, С. П. Богданов²,
А. В. Красиков¹, М. В. Старицын¹, А. А. Каширина¹

¹ ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горьнина НИЦ «Курчатовский институт» (Россия, 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49)

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 24-26/49)

gossmike@yandex.ru

Аннотация. В представленной работе приведены результаты по синтезу композиционных плакированных порошковых систем с типом строения «ядро–оболочка» для напыления износостойких металлокерамических покрытий. Для синтеза композиционного порошка в качестве ядра использованы порошки высокотвердых боридов TiB_2 и HfB_2 , а для создания оболочки на их поверхности – титан. Синтез плакирующего слоя осуществляли йодотранспортным методом. Плакирование порошка используемым методом подразумевает осаждение одного компонента на другой посредством газотранспорта, агентом которого выступает йод. Напыление композиционных плакированных порошков систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti осуществляли микроплазменным методом, который, в отличие от классического плазменного напыления, позволяет минимизировать фазовые превращения в композиционных порошках из-за термического воздействия. При исследовании поперечных микрошлифов напыленных покрытий определено, что в процессе микроплазменного напыления титан насыщается кислородом, образуя фазу диоксида титана. В результате плакированные композиционные порошки систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti превращаются в покрытия из систем $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ и $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$. Выявлены особенности распределения компонентов по толщине покрытия. Исследования твердости показали, что у покрытий на основе диборида титана интегральное значение микротвердости составляет 1300 HV. У покрытий на основе диборида гафния интегральная микротвердость составила порядка 1600 HV. При исследовании износостойкости пары с покрытиями $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ и $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ сопрягались с контртелом образца из стали 45Х без покрытия и совместно друг с другом. Несмотря на менее высокую микротвердость, наиболее износостойким является покрытие системы $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$.

Ключевые слова: износостойкие покрытия, плакированные композиционные порошки, диборид титана/титан, диборид гафния/титан, микроплазменное напыление, защитные и восстановительные покрытия

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 21-73-30019.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по соглашению № 13.ЦКП.21.0014, уникальный идентификатор RF-2296.61321X0014.

Для цитирования: Гошкодеря М.Е., Бобкова Т.И., Богданов С.П., Красиков А.В., Старицын М.В., Каширина А.А. Напыление износостойких покрытий из плакированных порошков TiB_2/Ti и HfB_2/Ti . *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(1): 27–34.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-27-34>

SPRAYING OF TiB_2/Ti AND HfB_2/Ti composite powder wear-resistant coatings

M. E. Goshkoderya¹ , T. I. Bobkova¹, S. P. Bogdanov²,
A. V. Krasikov¹, M. V. Staritsyn¹, A. A. Kashirina¹

¹ Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”, National Research Center “Kurchatov Institute” (49 Shpalernaya Str., St. Petersburg 191015, Russian Federation)

² St. Petersburg State Institute of Technology (24-26/49 Moskovskii Ave., St. Petersburg 190013, Russian Federation)

 gosmike@yandex.ru

Abstract. In this paper we studied the synthesis of composite core-shell powders sprayed as wear-resistant metal-ceramic coatings. High-hardness TiB_2 and HfB_2 powders form the core, and the shell is made of titanium. The cladding was applied by iodide transport technology. This cladding method involves deposition by gas transport with iodine as an agent. The TiB_2/Ti and HfB_2/Ti composite powders were sprayed using microplasma technology. In contrast to conventional plasma spraying, it minimizes the phase transformations in the composite powders induced by heating. Analysis of the final coating on polished cross sections revealed that during microplasma spraying, the titanium is oxygenated and it produces a titanium dioxide phase. As a result, the TiB_2/Ti and HfB_2/Ti composite powders are transformed into $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ and $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ coatings. We also studied the distribution of the components across the coating. The hardness measurements showed that the titanium diboride coatings obtain microhardness of 1300 HV. The microhardness of the hafnium diboride coatings is about 1600 HV. For abrasion testing of the $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ and $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ coatings we used uncoated alloyed 45Kh steel (similar to EU grade: 41Cr4) and the specified coatings as an abradant material. Despite their lower microhardness, the $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ coating showed the highest abrasion resistance.

Keywords: wear-resistant coatings, clad composite powders, titanium diboride/titanium, hafnium diboride/titanium, microplasma spraying, protective and restorative coatings

Acknowledgements: The work was carried out as part of the Project No. 21-73-30019 supported by the Russian Science Foundation.

Experimental studies were carried out on the equipment of the Center for Collective Use “Composition, Structure and Properties of Structural and Functional Materials” of the NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey” with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under agreement No. 13.CKP.21.0014, unique identifier RF-2296.61321X0014.

For citation: Goshkoderya M.E., Bobkova T.I., Bogdanov S.P., Krasikov A.V., Staritsyn M.V., Kashirina A.A. Spraying of TiB_2/Ti and HfB_2/Ti composite powder wear-resistant coatings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023; 66(1): 27–34.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-27-34>

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей при создании новых материалов и покрытий для машиностроительной отрасли является обеспечение возрастающих требований к их эксплуатационным свойствам и надежности. Внедрение новых композиционных материалов позволит увеличивать срок эксплуатации современных изделий и устройств, которые должны работать в условиях повышенных скоростей, температур, механических нагрузок и при воздействии различных агрессивных сред.

К перспективным материалам для создания композиционных покрытий относятся бориды переходных металлов, такие как TiB_2 и HfB_2 , которые обладают высокими показателями твердости, жаропрочности, износостойкости, коррозионной стойкости [1 – 5]. Существует ограниченное количество методов, которые позволяют формировать покрытия из материалов, содержащих бориды. В работе [6] представлены результаты по формированию методом химического осаждения из паровой фазы (CVD) покрытий HfB_2 и $\text{Hf} - \text{B} - \text{N}$, которые обладают высокой твердостью, достигающей до 40 ГПа. Также методом CVD наносят покрытия из ультравысокотемпературных боридов переходных металлов на пористые структуры. Способ нанесения таких покрытий включает реакцию термического газофазного разложения боргидридов титана, циркония и гафния из их растворов в высококипящих углеводородах предельного ряда при пропускании совместно паров боргидридов и растворителей через предварительно нагретые до 250 °С заготовки пористых материалов, помещенные в трубчатый реактор в условиях вакуума [7].

Широкий интерес проявляется к композитным покрытиям системы HfB_2/SiC , которые могут применяться как

защитные от окисления в различных агрессивных средах [8 – 12]. Легирование карбида кремния диборидом гафния значительно повышает механическую прочность при высоких температурах, теплопроводность и жаростойкость, при этом снижается коэффициент термического расширения. Такая система нашла широкое распространение как материал для изделий, работающих в условиях высоких температур и контактных нагрузок, например, как материал для конструктивных элементов ракетных двигателей твердого топлива [13].

В качестве метода спекания керамического порошка используют искровое плазменное спекание (ИПС), которое позволяет производить сверхвысокотемпературные и высокопрочные керамические материалы [14 – 16]. Спекание методом ИПС композиции $\text{HfB}_2 - \text{SiC}$, как правило, проводят при температурах 1800 – 2100 °С [17].

Несмотря на широкий комплекс высоких эксплуатационных и физико-механических характеристик, такие материалы не находят широкого применения в технике из-за высокой хрупкости и отсутствия технологий нанесения в чистом виде. Поэтому целесообразно использовать бориды с металлической связкой (пластификатором) в виде композита.

Эффективным методом создания композиционных высокодисперсных порошков является плакирование в газовой среде, когда один из используемых компонентов в смеси, переходя в газовую фазу, осаждается на поверхностях другого компонента. В качестве агента для газотранспорта используется йод. Возможность плакирования йодотранспортным методом более подробно раскрыта в работах [18, 19].

Основная масса деталей, работающих в условиях высоких контактных нагрузок, нуждается в восстановлении толщины в пределах до 1 мм [20]. В качестве

Химический состав порошка марки ПТОМ-1

Table 1. Chemical composition of PTOM-1 powder

Марка порошка	Титан	Массовая доля, %, не более					
		азот	углерод	водород	железо + никель	кремний	кальций
ПТОМ-1	Основа	0,08	0,05	0,40	0,40	0,10	0,08

перспективного метода напыления покрытий таких толщин рассматривается газотермическое [21]. В частности, микроплазменный метод позволяет напылять композиционные порошки, сохраняя высокие физико-механические свойства материалов, и формировать покрытия толщиной от 20 – 300 мкм за один проход.

Покрытия на основе предлагаемых систем композиционных порошков потенциально могут служить защитными и восстановительными для изделий, подверженных высоким контактным нагрузкам, воздействию переменных температур и влиянию агрессивной коррозионной среды в таких устройствах, как теплообменные аппараты, парогенераторы, трубопроводы, запорная арматура и элементы газотурбинных двигателей.

Цель настоящего исследования – йодотранспортный синтез плакированных порошков систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti , отработка режимов их напыления микроплазменным методом и определение эксплуатационных свойств покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве исходных материалов использованы:

– порошок титана марки ПТОМ-1 фракции 10 – 100 мкм производства АО «ПОЛЕМА» (химический состав представлен в табл. 1);

– порошок диборида титана дисперсностью порядка 1 – 4 мкм (химический состав, %: титан – 68,3; бор – 30,2; углерод – 0,1; железо – 0,05);

– порошок диборида гафния HfB_2 дисперсностью порядка 3 – 12 мкм, чистота которого составляет 99,8 % (химический состав: гафний – основа; бор – 29 %).

Морфология исходных компонентов представлена на рис. 1.

Из исходных компонентов были составлены механические смеси с соотношением по массовому эквиваленту $\text{MeB}_2:\text{Ti} = 50:50$ % (где Me – Ti или Hf). Подготовленные смеси синтезировались йодотранспортным методом, посредством которого титан переходил в газовую фазу за счет вступления в химическую реакцию с парами йода и транспортировался на поверхность керамических частиц. Интенсивность массопереноса варьировалась температурой и временем выдержки, соответственно температура плакирования составляла 700 °С, время процесса – 3 ч. Напыление покрытий производилось из синтезированных композиционных порошков систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti фракции от 20 до 80 мкм с помощью микроплазменного метода на установке УГНП-7/2250, оснащенной роботом-манипулятором Kawasaki FS003N. Мощность плазматрона составляла до 2,8 кВт, рабочий ток дуги плазматрона 35 – 40 А, напряжение 40 В. В качестве транспортиру-

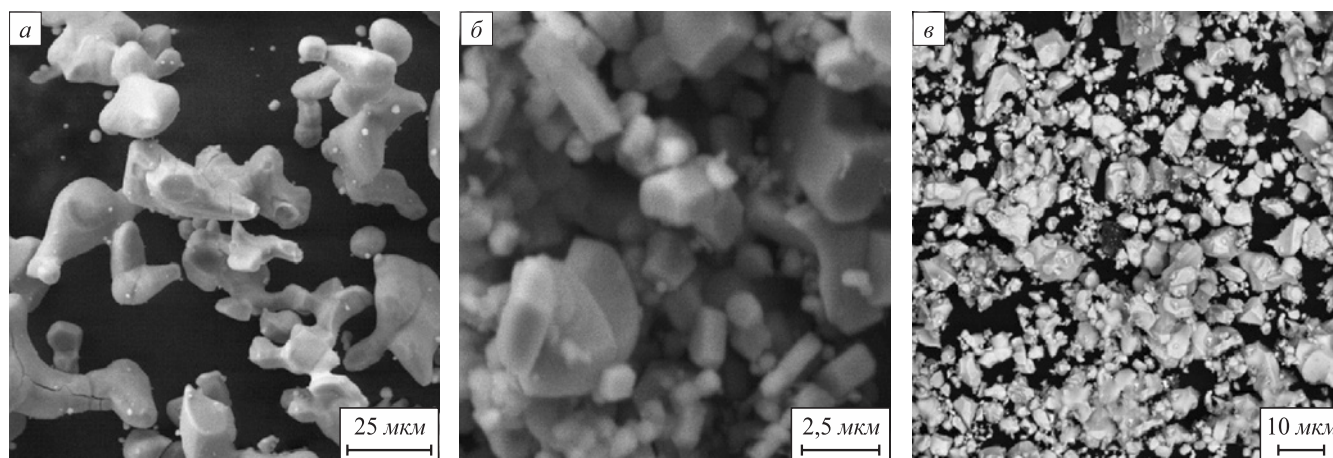


Рис. 1. РЭМ-микрофотографии исходных порошков:
а – ПТОМ-1; б – TiB_2 ; в – HfB_2

Fig. 1. SEM micrographs of the powders:
а – PTOM-1, б – TiB_2 , в – HfB_2

ющего и плазмообразующего газа использовался аргон с расходом 2 л/мин.

Исследование структуры порошков и поперечных микрошлифов покрытий проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tescan Vega 3. Исследование микротвердости покрытий по методу Виккерса осуществляли на микротвердомере ПМТ-3.

Ускоренные испытания на определение износостойкости проводились на машине трения 2168 УМТ. Машина относится к универсальным и позволяет испытывать различные пары трения с различным характером движения в широком диапазоне частот вращения

и нагрузок, с возможностью подачи в зону трения смазочных материалов. Образцы, на торцевую часть которых напыляется покрытие, сопрягаются друг с другом по кинематической схеме кольцо-кольцо при постоянном водяном охлаждении. Переменными параметрами при испытании являются прикладываемая по нормали к кольцу нагрузка, частота вращения кольца в плоскости и время испытания. Все представленные в работе образцы исследовались при нагрузке 0,5 МПа с частотой оборотов 100 об/мин в течение 5 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследована морфология композиционных порошков систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti , плакированных йодотранспортным методом. Типичная морфология приведена на рис. 2.

Композиционные частицы в основном наследуют форму исходных керамических компонентов, при этом часть частиц остается не плакированной и собирается в агломераты.

На рис. 3, 4 представлены РЭМ-микрофотографии поперечных микрошлифов покрытий из плакированных порошков систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti соответственно.

По изображениям, представленным на рис. 3, 4, можно отметить, что покрытия имеют четкие границы раздела с материалом подложки, в их толще отсутствуют сквозные поры. Частицы диборида титана и диборида гафния сохраняются в покрытии, о чем свидетельствует наличие темных и светлых областей на РЭМ-микрофотографиях в отраженных электронах. Таким образом, на рис. 3 светлым областям соответствует титан, темным – диборид титана. На РЭМ-изображениях покрытий (рис. 4) более темные области богаты титаном, а светлые – гафнием, что связано с большим атомным номером гафния. Покрытие на основе диборида титана в процессе напыления меняет свой фазовый состав – диборид частично переходит в моноборид титана, аналогичный эффект раскрыт в работах [22, 23]. В покрытии на основе порошка диборида гафния подобные превращения отсутствуют. Также в исследуемых покрытиях образуется фаза диоксида титана, что объясняется диффузией кислорода в процессе напыления. Ее можно идентифицировать в виде областей, которые имеют промежуточный контраст между участками, содержащими керамику и пластификатор.

На поперечных микрошлифах покрытий проведено исследование микротвердости. Покрытие системы $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ обладает интегральным значением твердости 1320 НВ со среднеквадратичным отклонением 1,0 единиц твердости при нагрузке 100 г. Покрытие системы $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ имеет интегральное значение твердости 1654 НВ со среднеквадратичным отклонением 3,2 единиц твердости при нагрузке 200 г.

Представленные данные свидетельствуют о высоких значениях твердости керамических компонентов, нахо-

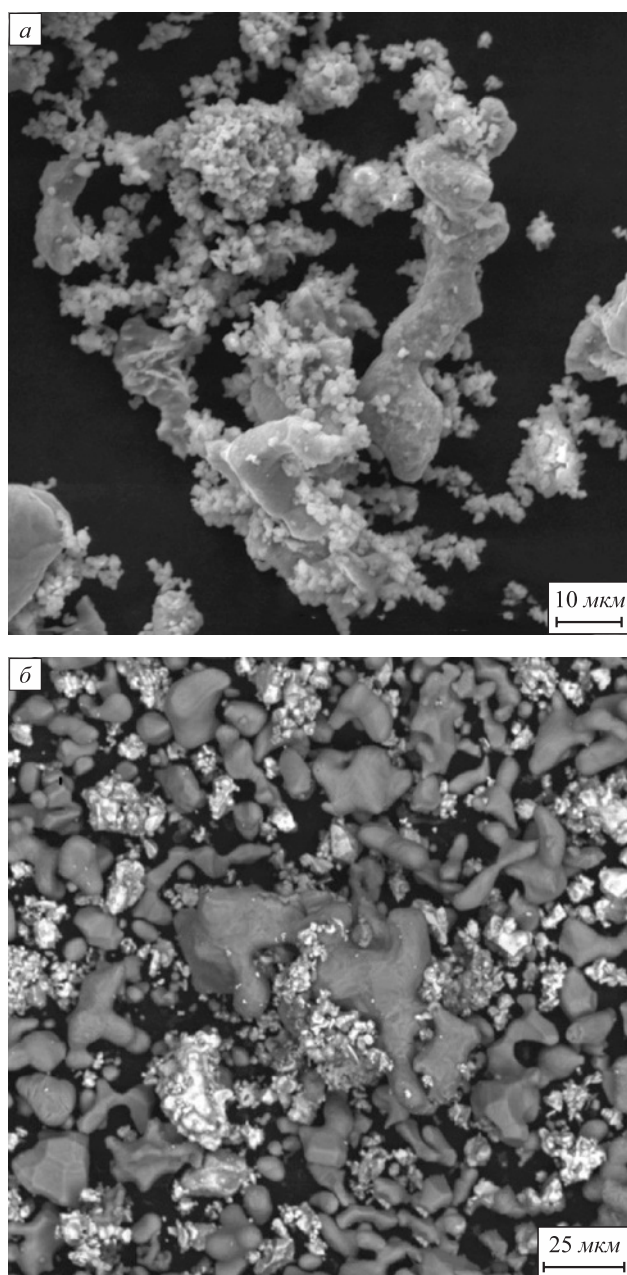


Рис. 2. РЭМ-микрофотографии плакированных порошков:
а – TiB_2/Ti ; б – HfB_2/Ti

Fig. 2. SEM images of the clad powders:
а – TiB_2/Ti ; б – HfB_2/Ti

дящихся в покрытиях. Твердость композиции HfB_2/Ti является более высокой, что связано с отсутствием фазового перехода у керамического компонента. Как упоминалось ранее, диборид титана в процессе напыления насыщается титаном, в результате чего образуется моноборид, что приводит к незначительному снижению твердости, так как твердость диборида титана достигает 35 ГПа, а моноборида титана – 28 ГПа [24, 25].

Для напыленных покрытий исследовались показатели износостойкости. На первом этапе образцы

с покрытиями сопрягались с контртелом из стали 45Х (табл. 2, опыты 1 и 2), на втором сопрягалась пара образцов с двумя типами покрытий (табл. 2, опыт 3). В табл. 2 представлены изменения массы, весовой износ и скорость изнашивания всех сопрягаемых пар.

Весовой износ покрытий на основе $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ в 1,4 раза ниже весового износа стального образца, при этом потери массы материалов покрытия и контртела находятся на низком уровне. В аналогичных условиях сопряжения покрытия с диборидом гафния и контртела из стали 45Х потеря массы увеличивается, а значения износа стального образца выше, чем у образца с покрытием в 7,9 раз. Это связано с более высокими значениями твердости покрытий системы $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$.

При сопряжении образцов с покрытиями систем $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ и $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ наиболее износостойким оказалось покрытие, содержащее диборид титана. Весовой износ покрытия системы $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$

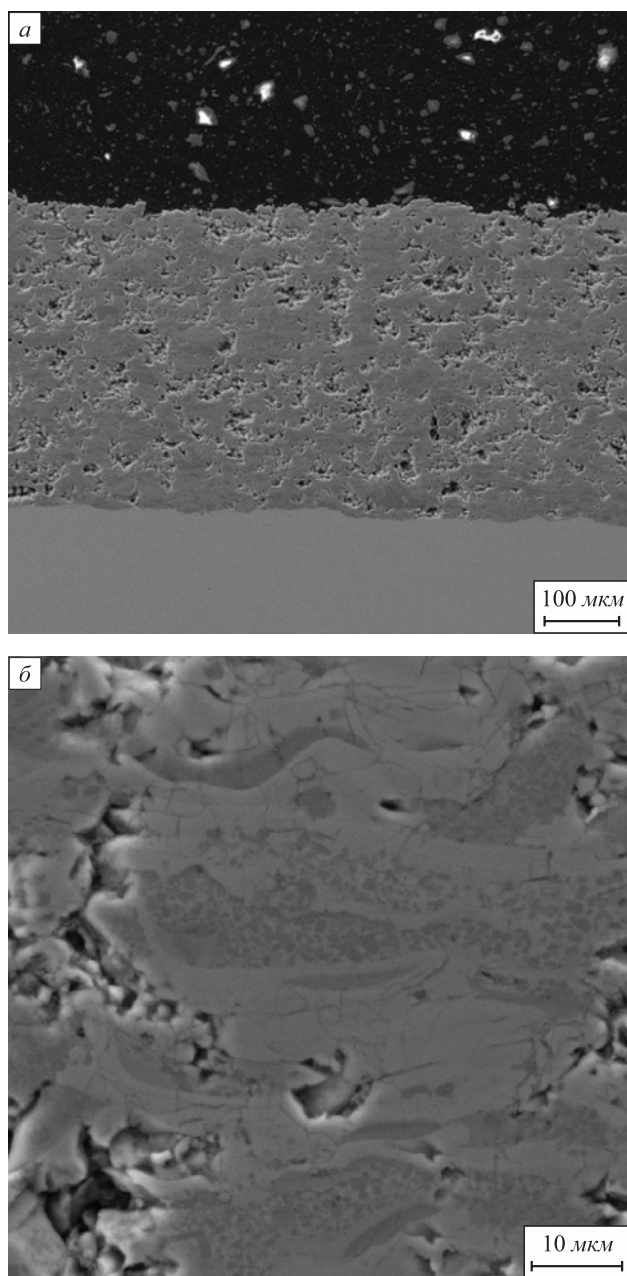


Рис. 3. РЭМ-микрофотография в отраженных электронах поперечного микрошлифа покрытия из TiB_2/Ti :
а – $\times 300$; б – $\times 3600$

Fig. 3. Backscattered electron SEM images of TiB_2/Ti coating polished cross-section:
а – $\times 300$, б – $\times 3600$

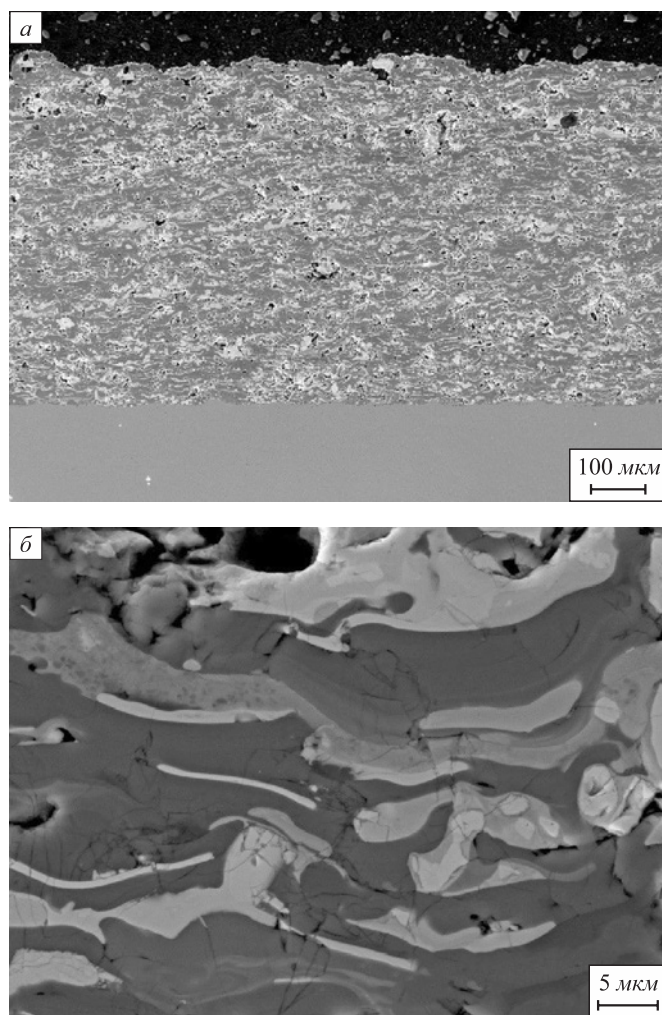


Рис. 4. РЭМ-микрофотография в отраженных электронах поперечного микрошлифа покрытия из HfB_2/Ti :
а – $\times 300$; б – $\times 3600$

Fig. 4. Backscattered electron SEM images of HfB_2/Ti coating polished cross-section:
а – $\times 300$, б – $\times 3600$

Показатели износостойкости исследуемых систем материалов

Table 2. Wear resistance properties of the coatings

Номер опыта	Пара трения	Масса образца, г			Весовой износ, г/км	Скорость изнашивания, г/ч
		до испытания	после испытания	Δm		
1	45X	37,4536	37,4522	0,0014	0,000619250	0,00028
	$\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$	36,9823	36,9813	0,0010	0,000442321	0,00020
2	45X	37,4775	37,4632	0,0143	0,006325195	0,00286
	$\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$	37,3925	37,3907	0,0018	0,000796178	0,00036
3	$\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$	37,0552	37,0451	0,0101	0,004467445	0,00202
	$\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$	37,6530	37,6130	0,0400	0,017692852	0,00800

выше, чем у покрытия системы $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ в 3,9 раз, не смотря на его более высокую микротвердость. Такой результат объясняется более высокими пластическими характеристиками покрытия на основе диборида титана, так как в результате напыления образуется моноборид титана, который создает химическую связь между кристаллическими решетками исходных фаз, что препятствует варьированию керамического компонента при трении. Подобная связь с пластификатором отсутствует в покрытии на основе диборида гафния, в результате чего покрытие $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ изнашивается сильнее, чем покрытие $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ при идентичных контактных нагрузках.

Выводы

Показаны результаты по синтезу металлокерамических порошков систем TiB_2/Ti и HfB_2/Ti . Исходные компоненты для смесей были взяты в равном массовом соотношении 50:50 %. Синтез проводился в течение 3 ч при температуре 700 °С.

Представлены данные по микроплазменному напылению покрытий из плакированных композиционных порошков TiB_2/Ti и HfB_2/Ti , а также исследованию их свойств.

Изучение морфологии показало, что частицы керамических компонентов фиксируются в матрице покрытия, образуя структуру без сквозной пористости. Фазовый состав композиционных порошков на основе диборида титана в результате энергетического воздействия во время напыления изменяется с TiB_2/Ti на $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$.

В покрытиях $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ интегральное значение твердости составляет 1320 HV, в покрытиях $\text{HfB}_2/\text{Ti}(\text{TiO}_2)$ – 1654 HV. Испытания по определению износостойкости покрытий показали, что при сопряжении их со стальным контртелом (из стали 45X) уровень весового износа покрытий превосходит стальные образцы не менее, чем в 1,4 раза. Наиболее эффективным оказалось покрытие системы $\text{TiB}_2(\text{TiB})/\text{Ti}$, так как

его износ при контакте со стальным образцом и покрытием системы HfB_2/Ti является наименьшим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Герасимова Н.С. *Основные виды композиционных материалов и керамики: Учебное пособие*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2019: 32.
Gerasimova N.S. *The Main Types of Composite Materials and Ceramics: Manual*. Bauman Moscow State Technical University; 2019: 32. (In Russ.).
2. Иванцов А.Е., Рожкова Г.А. *Бориды: Методическое указание*. Казань: Казанский государственный технологический университет; 2006: 19.
Ivantsov A.E., Rozhkova G.A. *Borides: Methodical instruction*. Kazan: Kazan State Technol. University; 2006: 19. (In Russ.).
3. Goncharov A.A., Dub S.N., Agulov A.V., Petukhov V.V. Structure, composition, and mechanical properties of thin films of transition metals diborides. *Journal of Superhard Materials*. 2015; 37(6): 422–428.
<https://doi.org/10.3103/S1063457615060076>
4. Liang R., Shiota T., Omiya Y., Fujii M. Dry friction and wear behavior of various boride hard coating films. *The Proceedings of Conference of Chugoku-Shikoku Branch*. 2021; 59: 05b1. <https://doi.org/10.1299/jsmeecs.2021.59.05b1>
5. Портнова Е.Н. *Получение ультравысокотемпературных керамических материалов на основе диборидов циркония и гафния. Диссертация ... кандидата технических наук*. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 2016: 137.
Portnova E.N. *Production of ultra-high-temperature ceramic materials based on zirconium and hafnium diborides: Cand. Tech. Sci. Diss.* Perm National Research Polytechnic University; 2016: 137. (In Russ.).
6. Jayaraman S., Gerbiac J.E., Yangac Y., Kimbc D.Y., Chatterjeeac A., Bellonac P., Girolamibc G.S., Chevalierd J.P., Abelsonac J.R. HfB_2 and Hf-B-N hard coatings by chemical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006; 200 (22–23): 6629–6633.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.040>
7. Дугин С.Н., Гребенников А.В., Богачев Е.А., Гуркова Э.Л., Стороженко П.А., Коломийцев И.А., Степа-

- нов Г.В. Способ нанесения окислительностойких и ультравысокотемпературных покрытий из диборидов титана, циркония и гафния на композиционные материалы. Патент РФ № 2 675 618. Оpubл. 20.12.2018.
- Dugin S.N., Grebennikov A.V., Bogachev E.A., Gurokova E.L., Storozhenko P.A., Kolomiitsev I.A., Stepanov G.V. Method of applying oxidation-resistant and ultra-high-temperature coatings of titanium, zirconium and hafnium diborides to composite material. Patent RF no. 2 675 618. Publ. 20.12.2018 (In Russ.).
8. Pavese M., Fino P., Badini C., Ortona A., Marino G. HfB_2/SiC as a protective coating for 2D Cf/SiC composites: Effect of high temperature oxidation on mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*. 2008; 202 (10): 2059–2067. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.08.037>
 9. Ren X., Li H., Chu Y., Fu Q., Li K. Ultra-high-temperature ceramic $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ coating for oxidation protection of SiC -coated carbon/carbon composites. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2015; 12 (3): 560–567. <https://doi.org/10.1111/ijac.12241>
 10. Zhou L., Zhang J., Hu D., Fu Q., Ding W., Hou J., Liu B., Tong M. High temperature oxidation and ablation behaviors of $\text{HfB}_2\text{-SiC}/\text{SiC}$ coatings for carbon/carbon composites fabricated by dipping-carbonization assisted pack cementation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022; 111: 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.08.092>
 11. Zhang P., Fu Q., Cheng C., Sun J., Zhang J., Xu M., Zhu X. Microstructure evolution of in-situ $\text{SiC-HfB}_2\text{-Si}$ ternary coating and its corrosion behaviors at ultra-high temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021; 41(13): 6223–6237. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.058>
 12. Потанин А.Ю., Погужев Ю.С., Рупасов С.И., Швындина Н.В., Левашов Е.А. Получение СВС-керамики $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ для высокотемпературных областей применения. В кн.: Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы 14-й Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию порошковой металлургии Беларуси, Минск, 9–11 сентября 2020 года. Минск: ИД «Белорусская наука»; 2020: 409–414.
 - Potani A.Yu., Pogozhev Yu.S., Rupasov S.I., Shvyndina N.V., Levashov E.A. Obtaining SHS-ceramics $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ for high-temperature applications. In: *New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding: Materials of the 14th Int. Sci. and Tech. Conf. Dedicated to the 60th Anniversary of Powder Metallurgy of Belarus, Minsk, September 9–11, 2020*. Minsk: Belorusskaya nauka; 2020: 409–414. (In Russ.).
 13. Швалева Н.А., Иванов М.Е. Совершенствование конструкции и технологии изготовления стакана РДТТ. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017; 1(13): 47–49.
 - Shvaleva N.A., Ivanov M.E. Improving the design and manufacturing technology of the RDTT glass. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2017; 1(13): 47–49. (In Russ.).
 14. Nisar A., Balani K. Phase and microstructural correlation of spark plasma sintered $\text{HfB}_2\text{-ZrB}_2$ based ultra-high temperature ceramic composites. *Coatings*. 2017; 7(8): 110. <https://doi.org/10.3390/coatings7080110>
 15. Monteverde F. Ultra-high temperature $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ ceramics consolidated by hot-pressing and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007; 428(1–2): 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.01.107>
 16. Zapata-Solvas E., Jayaseelan D.D., Lin H.T., Brown P., Lee W.E. Mechanical properties of ZrB_2 - and HfB_2 -based ultra-high temperature ceramics fabricated by spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*. 2013; 33(7): 1373–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.12.009>
 17. Гращенко Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Особенности спекания тугоплавкой керамики на основе HfB_2 методом гибридного искрового плазменного спекания. *Журнал прикладной химии*. 2015; 88(3): 379–386. Grashchenkov D.V., Sorokin O.Yu., Lebedeva Yu.E., Vaganova M.L. Specific features of sintering of HfB_2 -based refractory ceramic by hybrid spark plasma sintering. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015; 88(3): 379–386. <https://doi.org/10.1134/S1070427215030040>
 18. Богданов С.П. Получение покрытий на порошках методом йодного транспорта. *Физика и химия стекла*. 2011; 37(2): 229–237.
 - Bogdanov S.P. Preparation of coatings on powders by the iodide transport method. *Glass Physics and Chemistry*. 2011; 37(2): 172. <https://doi.org/10.1134/S1087659611020040>
 19. Богданов С.П. Йодотранспортный метод получения покрытий на порошках. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института. Химия и химическая технология. Технология неорганических веществ*. 2012; 16(42): 24–28.
 - Bogdanov S.P. Iodotransport method of obtaining coatings on powders. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. Tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv*. 2012; 16 (42): 24–28. (In Russ.).
 20. Корнев А.Б., Кулик Ю.Г., Фунтикова Е.В. К вопросу стратегии восстановления деталей газотермическим напылением. *Судостроение и ремонт. Вестник Волжского государственного университета водного транспорта*. 2004: 166–174.
 - Kornev A.B., Kulik Yu.G., Funtikova E.V. On the strategy for restoring parts by gas-thermal spraying. In: *Sudostroenie i remont. Vestnik Volzhskogo gosudarstvennogo universiteta vodnogo transporta*. 2004: 166–174. (In Russ.).
 21. Калита В.И., Комлев Д.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. Москва: Лидер М; 2008: 388.
 - Kalita V.I., Komlev D.I. *Plasma Coatings with Nanocrystalline and Amorphous Structure: Monograph*. Moscow: LIDER M; 2008: 388. (In Russ.).
 22. Гошкодеря М.Е., Бобкова Т.И. Разработка новых композиционных материалов объемноармированной конфигурации на основе системы Ti/TiB_2 для напыления износостойких покрытий, эффективных при воздействии отрицательных температур. В кн.: *Сборник тезисов VIII Всероссийского молодежного научного форума «OpenScience 2021», Гатчина, 17–19 ноября 2021: 105–106.*
 - Goshkoderya M.E., Bobkova T.I. Development of new composite materials of volumetrically reinforced configuration based on the Ti/TiB_2 system for spraying wear-resistant coat-

- ings effective under negative temperatures. In: *Coll. of Abstracts of the VIII All-Russ. Youth Sci. Forum "OpenScience 2021"*, Gatchina, November 17–19, 2021: 105–106. (In Russ.).
23. Goshkoderya M.E., Bobkova T.I., Staritsyn M.V. Investigation of Ti/TiB_2 system composite coatings sprayed by microplasma method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022; 2182(1): 012073.
 24. Крутский Ю.Л., Черкасова Н.Ю., Гудыма Т.С., Нецкина О.В., Крутская Т.М. Дибориды некоторых переходных металлов: свойства, области применения и методы получения. Часть 1. Дибориды титана и ванадия (обзор). *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021; 64(2): 149–164. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-149-164>
 25. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. *Тугоплавкие соединения: Справочник*. Москва: Металлургия; 1976: 500. Samsonov G.V., Vinititskii I.M. *Refractory Compounds (Handbook)*. Moscow: Metallurgy; 1976: 500. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Михаил Евгеньевич Гошкодеря, инженер, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

E-mail: gosmike@yandex.ru

Татьяна Игоревна Бобкова, к.т.н., начальник лаборатории, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

E-mail: mail@crism.ru

Сергей Павлович Богданов, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

E-mail: BogdanovSP@mail.ru

Алексей Владимирович Красиков, к.х.н., заместитель начальника, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

E-mail: mail@crism.ru

Михаил Владимирович Старицын, инженер, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

E-mail: mail@crism.ru

Анастасия Анверовна Каширина, инженер, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

E-mail: mail@crism.ru

Mikhail E. Goshkoderya, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"

E-mail: gosmike@yandex.ru

Tat'yana I. Bobkova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"

E-mail: mail@crism.ru

Sergei P. Bogdanov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., St. Petersburg State Institute of Technology

E-mail: BogdanovSP@mail.ru

Aleksei V. Krasikov, Cand. Sci. (Chem.), Deputy Head of Research Department, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"

E-mail: mail@crism.ru

Mikhail V. Staritsyn, Engineer, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"

E-mail: mail@crism.ru

Anastasiya A. Kashirina, Engineer, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"

E-mail: mail@crism.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. Е. Гошкодеря – подготовка исходных материалов, участие в синтезе композиционных плакированных порошков, участие в исследовании морфологии порошков/покрытий, напыление микроплазменным методом, определение показателей твердости и износостойкости.

Т. И. Бобкова – напыление микроплазменным методом, определение показателей твердости и износостойкости.

С. П. Богданов – синтез композиционных плакированных порошков исследуемых систем.

А. В. Красиков – участие в испытаниях по определению износостойкости.

М. В. Старицын – исследование материалов на растровом электронном микроскопе.

А. А. Каширина – исследование материалов на растровом электронном микроскопе.

M. E. Goshkoderya – preparation of source materials; participation in synthesis of composite clad powders; participation in the study of powders/coatings morphology; spraying by microplasma method; determination of indicators of hardness and wear resistance.

T. I. Bobkova – deposition by microplasma method; determination of indicators of hardness and wear resistance.

S. P. Bogdanov – synthesis of composite clad powders of the studied systems.

A. V. Krasikov – participation in tests to determine wear resistance.

M. V. Staritsyn – study of materials on a scanning electron microscope.

A. A. Kashirina – study of materials on a scanning electron microscope.

Поступила в редакцию 18.08.2022
После доработки 27.11.2022
Принята к публикации 05.01.2023

Received 18.08.2022
Revised 27.11.2022
Accepted 05.01.2023