

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ДИОКСИД ТИТАНА

<sup>1</sup>А.С. Калиниченко, <sup>2</sup>О.Г. Девойно, <sup>2</sup>В.В. Мешкова, <sup>1</sup>В.Г. Лугин

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет,

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

*В статье изучены особенности формирования композиционных плазменных покрытий на основе никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-ХН80СР4 упрочненных диоксидом титана. Изучены физико-механические свойства указанного покрытия и его структура, произведен элементный анализ, а также установлено распределение основных фаз в покрытии. Установлено влияние содержания упрочняющей фазы в составе исходной смеси для напыления на физико-механические свойства полученных композиционных покрытий, в частности твердость и микротвердость. Установлено отсутствие химической связи между матрицей сплава и частицами упрочняющей фазы.*

**Ключевые слова:** плазменное напыление, композиционные покрытия, самофлюсующиеся порошки, оксидная керамика, оксид титана, структура, твердость, микротвердость, химический состав

## SPECIFIC FEATURES OF COMPOSITE COATINGS FORMATION CONTAINING TITANIUM OXIDE

<sup>1</sup>A.S. Kalinichenko, <sup>2</sup>O.G. Devoino, <sup>2</sup>V.V. Meshkova, <sup>1</sup>V.G. Lugin

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University,

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University,  
Minsk, Republic of Belarus

*The article studies the features of the composite plasma coatings formation based on the self-fluxing nickel alloy PG-XH80CP4 reinforced with titanium dioxide. The physical and mechanical properties of the specified coating and its structure were studied as well as elemental analysis was performed. The distribution of the main phases in the coating was established. The effect of the hardening phase content in the composition of the initial mixture for spraying on physical and mechanical properties of the obtained composite coatings, in particular, hardness and microhardness, was established. The absence of a chemical bond between the alloy matrix and the particles of the hardening phase is established.*

**Keywords:** plasma spraying, composite coatings, self-fluxing powders, oxide ceramics, titanium oxide, structure, hardness, microhardness, chemical composition

**E-mail:** vera.miashkova2015@gmail.com

### Введение

Сплавы на основе никеля представляют широкий научный и практический интерес благодаря высокой коррозионной стойкости, сопротивлению высокотемпературному

окислению, высокой твердости и износостойкости. Среди сплавов на основе никеля особое место занимают самофлюсующиеся сплавы, которые характеризуются высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами получаемых из них покрытий. Это такие свойства как высокая плотность, адгезионная и когезионная прочность. Данные сплавы применяются для создания на упрочняемых поверхностях методами напыления и наплавки покрытий с высокой стойкостью к коррозии, абразивному изнашиванию, высокотемпературному окислению, агрессивным средам при умеренных ударных нагрузках. Они содержат элементы, улучшающие смачиваемость и обеспечивающие самофлюсование жидкого металла. Бор и кремний образуют с никелем и хромом легкоплавкие эвтектики с температурой плавления 950–1080 °С, а также восстанавливают окисные пленки на поверхности частиц порошка и подложки с образованием боросиликатных шлаков, которые всплывают на поверхности покрытия при самофлюсовании [1, 2].

Перспективным направлением развития в области повышения эксплуатационных свойств никелевых сплавов является создание композиционных материалов на основе данных материалов. Одним из направлений создания композиционных материалов на основе никеля является упрочнение матрицы никелевых сплавов частицами тугоплавких соединений [3].

Классической технологией по отношению к исследуемой является использование в качестве порошковой смеси для напыления и наплавки сплава ПС-12НВК-01, представляющего собой механическую смесь самофлюсующегося порошка ПГ-10Н-01 (65 %) и порошка карбида вольфрама (35 %) [2]. Данный сплав применяется для получения покрытий, обладающих повышенной стойкостью к истиранию и эрозии, в том числе при повышенных температурах. Покрытия из данного материала наносятся через промежуточный слой ПГ-12Н-01 с оплавлением, после которого твердость покрытий составляет 57–64 HRC, рабочая температура до 700 °С; толщина покрытия может достигать 2 мм. Данный сплав, несмотря на высокие физико-механические и эксплуатационные характеристики, в настоящий момент имеет высокую стоимость из-за наличия карбида вольфрама, что сдерживает его широкое применение. Поэтому, перспективной является оценка возможности применения в качестве упрочняющей фазы более дешевых компонентов.

В ранее проведенных исследованиях [4, 5] были изучены свойства композиционных покрытий, полученных методом плазменного напыления порошковых смесей самофлюсующегося сплава ПГ-ХН80СР4, содержащих оксид алюминия в качестве упрочняющей фазы, а также для снижения общей стоимости покрытий в сравнении с покрытиями, содержащих карбид вольфрама. Исследования показали перспективность использования данного композиционного материала, а также выявили целесообразность исследования покрытий, содержащих другие тугоплавкие оксиды в качестве упрочняющей фазы, в частности, диоксид титана  $TiO_2$ . Интерес к использованию данного материала, обусловленный его свойствами, отражен в большом количестве современных исследований [6]. В данном случае диоксид титана, как и оксид алюминия, вводится в состав самофлюсующегося порошка для придания покрытию более высоких эксплуатационных свойств.

Диоксид титана ( $T_{пл} = 1840$  °С) обладает высоким значением диэлектрической проницаемости, что позволяет использовать его для изготовления керамических конденсаторов, а также для получения износостойких покрытий малонагруженных подшипников, покрытий, стойких к абразивному изнашиванию при температурах ниже 540 °С, жаростойких покрытий [7]. Также диоксид титана применяется в качестве добавки к сырью оксида алюминия для снижения температуры спекания корунда до 1500–1550 °С при изготовлении спеченных керамических материалов, в металлургии твердых сплавов в лакокрасочной промышленности и т.д. Имеет две полиморфные модификации –  $\alpha$ - $TiO_2$  (рутил) и  $\beta$ - $TiO_2$  (анатаз). Диоксид титана на-

ходит применение в качестве добавки в порошковые смеси с оксидом алюминия, как в виде механических смесей, так и в виде порошков  $Al_2O_3$ , плакированных  $TiO_2$  для использования в качестве защитных покрытий против воздействия различных кислот.  $TiO_2$  придает материалам большую пластичность и стойкость к ударным нагрузкам [8].

**Целью данной работы** являлось изучение структурных особенностей и физико-механических характеристик композиционных покрытий, полученных методом плазменного напыления порошковой смеси самофлюсующегося сплава ПГ-ХН80СР4 и упрочненной диоксидом титана в различных объемных концентрациях.

### Материалы, методики, оборудование

#### **В работе исследовались следующие материалы и покрытия:**

1. Покрытия, полученные напылением смеси порошков ПГ-ХН80СР4 с диоксидом титана (объемное содержание  $TiO_2$  составляет 15–33 %), оплавленные после нанесения в соответствии с технологией напыления самофлюсующихся покрытий по ГОСТ 28844–90.

2. Покрытие, полученное напылением чистого порошка ПГ-ХН80СР4, оплавленное после нанесения в соответствии с технологией напыления самофлюсующихся покрытий по ГОСТ 28844–90.

3. Покрытие, полученное напылением порошкового материала ПС-12НВК-01, оплавленное после нанесения в соответствии с технологией напыления самофлюсующихся покрытий по ГОСТ 28844–90, в качестве эталонного материала.

Химический состав сплавов для напыления приведен в табл. 1.

**Табл. 1**

#### **Химический состав сплавов для напыления**

Сплавы	С	В	Si	Ni	Cr	Fe	WC	Твердость, HRC
Содержание компонентов в мас.%								
ПС-12НВК-01	0,61	2,8–3,4	4–4,5	Основа	14–20	34	35	57–64
ПГ-ХН80СР4	0,6–1,0	2,8–3,8	3,0–4,5	Основа	15–18	не более 5,0	–	55

Поверхность стали под покрытие подвергали обработке чугунной колотой дробью, в соответствии с ГОСТ 28844–90 для повышения адгезии между покрытием и основой. Параметры обработки:

1. Давление сжатого воздуха не менее 0,5–0,6 МПа;
2. Расход сжатого воздуха не менее 1,5 м<sup>3</sup>/мин;
3. Размер дроби: 70 % размером 1,0 мм и 30 % размером 1,8 мм.

Нанесение покрытия на обрабатываемую поверхность осуществлялось с помощью установки плазменного напыления УПУ-ЗД с плазмотроном ПП-25, предназначенным для напыления всех видов порошковых материалов. Напыление основного покрытия производили через промежуточный слой самофлюсующегося сплава ПГ-ХН80СР4, толщиной 0,1 мм для улучшения адгезии покрытия к основе. Грануляция частиц напыляемого композиционного материала составила 40–80 мкм.

Режимы напыления композиционного покрытия:

1. Напряжение дуги – 80 В;
2. Сила тока дуги – 380 А;
3. Дистанция напыления 0,8–0,9 м;
4. Расход плазмообразующего газа (азот) 30–35 л/мин; расход транспортирующего газа (азот) 3–5 л/мин.

Исследования структуры и элементный анализ проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония). Данный прибор предназначен для изучения микроструктуры и химического состава различных материалов, позволяет получать изображение с реальной поверхности. Увеличение составляет от  $\times 18$  до  $\times 300\,000$ . Анализируемые элементы от В (бор) до U (уран). Диапазон концентраций 0,1–100. Также для структурного и элементного анализа применялся сканирующий электронный микроскоп Vega ILLMU с микроанализатором INCA Energy 350, который позволяет выполнять качественный и количественный (по списку элементов) рентгеновские микроанализы с выбором анализируемой области или точки, получать карты распределения элементов по площади и профили вдоль линии. Энергодисперсионный рентгеновский микрозондовый анализ позволяет определить химический состав образца во всем интервале концентраций от 0,1 до 100 %, с точностью  $\pm 2$  %.

Исследования твердости производились с помощью портативного твердомера комбинированного действия МЕТ-УДА, динамическим методом по шкале Роквелла. Твердость измеряли на двух образцах каждой композиции, по пять измерений на каждом образце. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3, при нагрузке 100 г, в направлении от поверхности покрытия к основе.

### Результаты и обсуждение

Общий вид микроструктуры композиционных покрытий, полученных плазменным напылением порошковых смесей, представлен на рис. 1. Покрытие имеет плотную слоистую структуру, характерную для самофлюсующихся сплавов, с заметной границей раздела покрытие-основа и темными включениями диоксида титана в виде чешуек, образовавшихся в процессе расплавления частиц диоксида и соударения их с основой и нижележащими слоями покрытия, а также включениями упрочняющих фаз карбидов и боридов хрома. Частицы диоксида титана имеют малую толщину и равномерно распределены в структуре покрытия, количество их пропорционально содержанию упрочняющей фазы в исходной смеси для напыления. Толщина и распределение частиц упрочняющей фазы говорит о достаточном проплавлении всех компонентов напыляемой смеси в плазменной струе. На границе раздела покрытия и основы наблюдается тонкий слой, по данным авторов работы [9] состоящий из твердого раствора на основе никеля, с зоной взаимной диффузии Fe в покрытие, а Ni, Si, В – в основу.

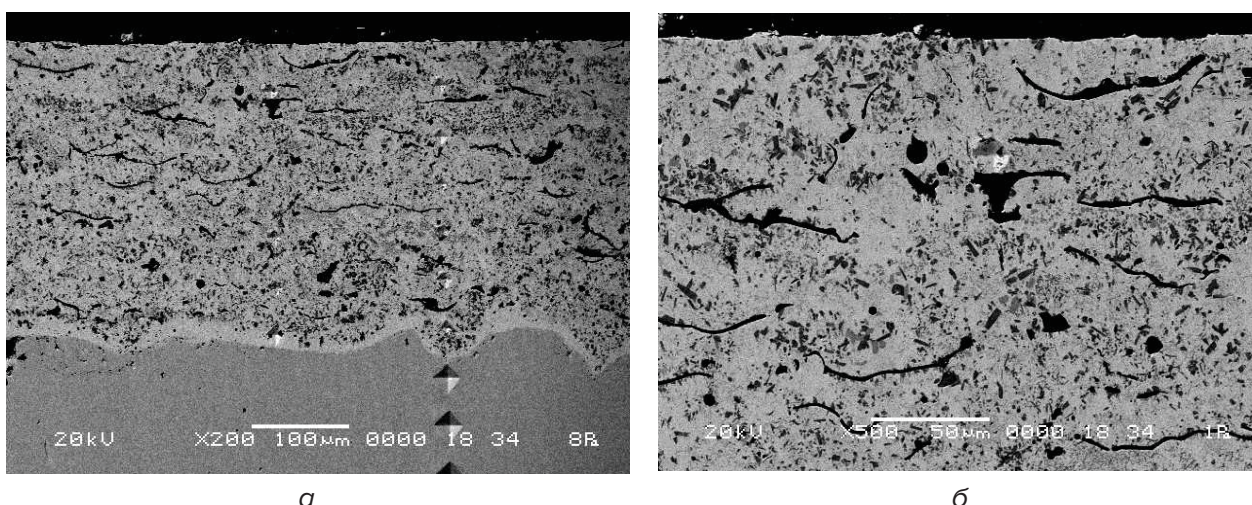


Рис. 1. Микроструктура плазменного покрытия, состоящего из смеси порошков ПГ-ХН80СР4 и диоксида титана (33 %):  
 а – увеличение  $\times 200$ ; б – увеличение  $\times 500$

Сравнение структур покрытий с различным объемным содержанием диоксида титана (рис. 2) показало отсутствие заметных различий в структуре материалов по сравнению с чистым самофлюсом, за исключением включений расплавленных частиц  $TiO_2$ .

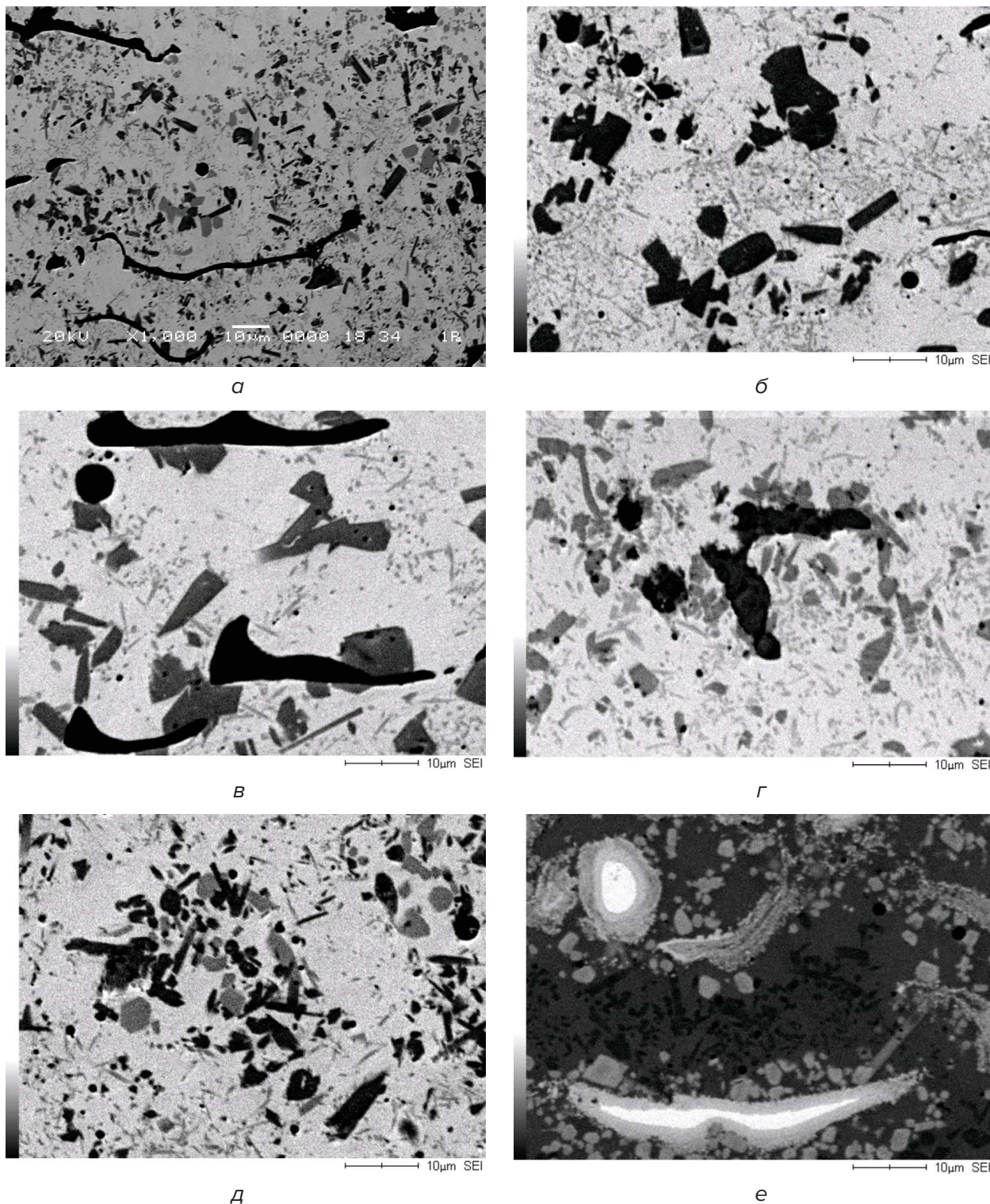


Рис. 2. Микроструктуры композиционных покрытий:  
*а* – ПГ-ХН80СР4+33 %  $TiO_2$ ; *б* – ПГ-ХН80СР4+25 %  $TiO_2$ ; *в* – ПГ-ХН80СР4+20 %  $TiO_2$ ;  
*г* – ПГ-ХН80СР4+15 %  $TiO_2$ ; *д* – ПГ-ХН80СР4 без добавок; *е* – ПС-12НВК-01

В структуре покрытий наблюдается никелевая матрица, представленная зернами Ni и эвтектикой Ni+Ni<sub>3</sub>B, а также включениями упрочняющих фаз, характерных для

самофлюсующегося покрытия – карбидов хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) и боридов хрома ( $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ ) (рис. 2, а, б, в, г, д), также диоксид титана (рис. 2, а, в, г).

Распределение фаз в покрытии подтверждается данными электронно-зондово-го химического анализа, отраженными в картах распределения химических элементов в покрытиях (рис. 3, 4, 5).

Заметные различия наблюдаются в структуре покрытий, сформированных на основе сплава ПС-12НВК-01, принятого в исследовании в качестве эталонного. Покрытия из данного материала также представляют собой никелевую матрицу, армированную включениями карбидов и боридов хрома (рис. 2, е, рис. 5) а также мелкими частицами карбида вольфрама. Покрытие также содержит крупные частицы карбида вольфрама, как не расплавившиеся (круглые), так и расплавившиеся частично, и подвергшиеся пластической деформации в процессе напыления.

В ходе исследований элементного анализа с использованием электронного микроскопа Vega IILMU с микроанализатором INCA Energy 350 установлено, что темные включения в виде чешуек в структуре покрытий, наблюдавшиеся в покрытиях из смесей порошков с диоксидом титана, представляют собой частицы  $\text{TiO}_2$  а не чистого титана, так как можно было ожидать, что в процессе напыления и оплавления покрытия могла происходить диссоциация  $\text{TiO}_2$  под влиянием высоких температур и наличия в составе покрытия бора, кремния и углерода, способных восстанавливать диоксид титана при высоких температурах. Результаты исследования (рис. 6, 7) показали, что темные включения в структуре покрытия являются диоксидом титана (табл. 2, спектры 1, 2, 3, 7), что говорит об отсутствии диссоциации частиц упрочняющей фазы под воздействием плазменной струи и экзотермических реакций в покрытии в процессе его оплавления.

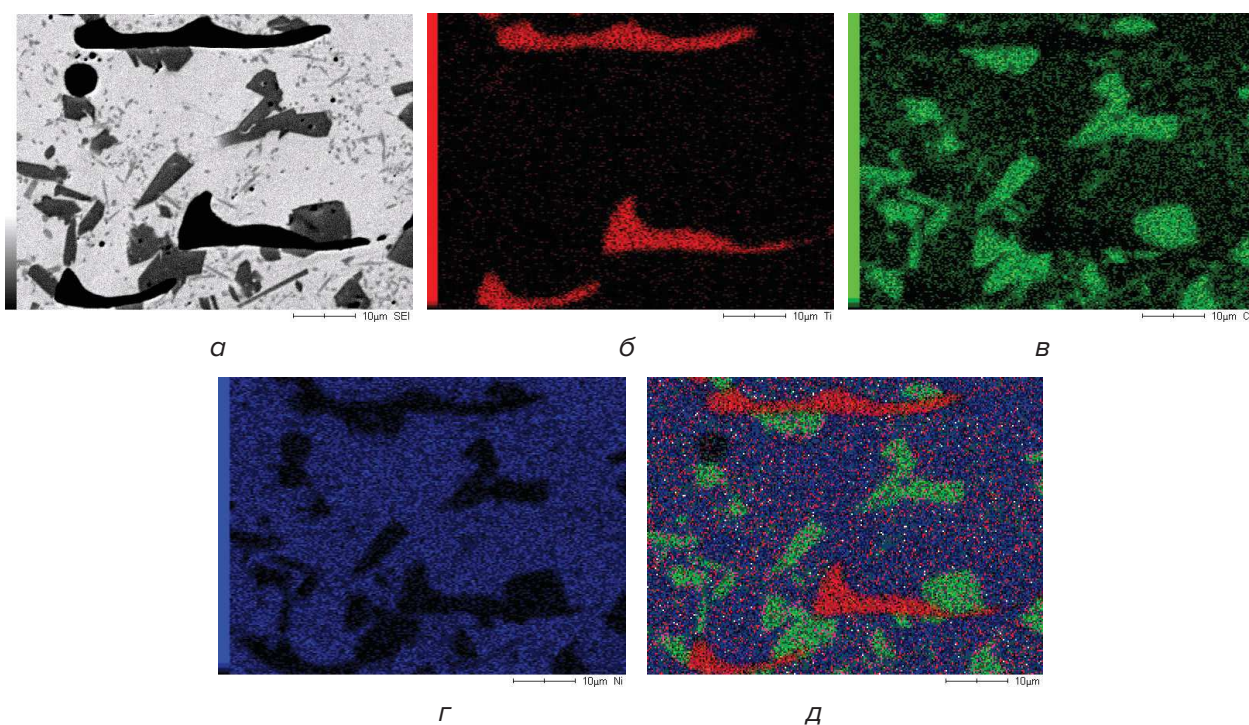


Рис. 3. Карты распределения химических элементов в покрытии ПГ-ХН80СР4+20 %  $\text{TiO}_2$ , а – общий вид участка покрытия; б – распределение соединений титана; в – распределение соединений хрома; г – распределение соединений никеля; д – совмещение карт распределения соединений Ti, Cr, Ni

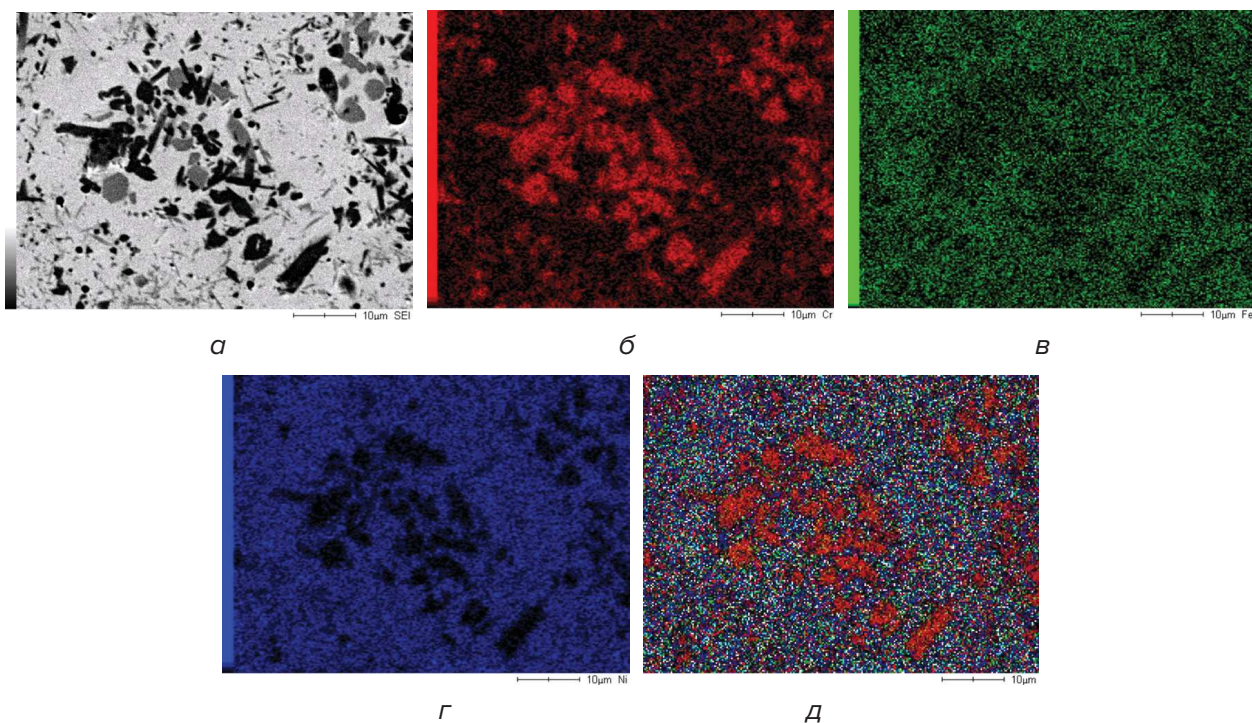


Рис. 4. Карты распределения химических элементов в покрытии ПГ-ХН80СР4:  
*а* – общий вид участка покрытия; *б* – распределение соединений хрома;  
*в* – распределение соединений железа; *г* – распределение соединений  
 никеля; *д* – совмещение карт распределения соединений Cr, Fe, Ni

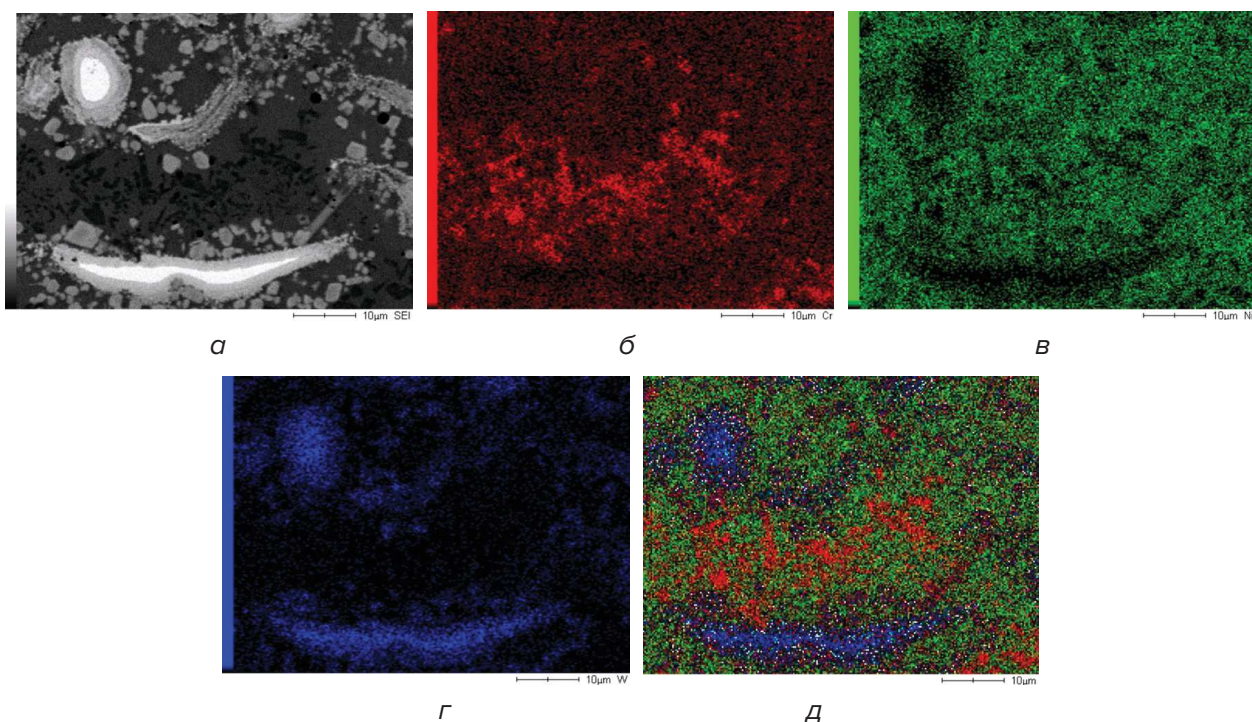


Рис. 5. Карты распределения химических элементов в покрытии ПС-12НВК-01:  
*а* – общий вид участка покрытия; *б* – распределение соединений хрома;  
*в* – распределение соединений никеля; *г* – распределение соединений  
 вольфрама; *д* – совмещение карт распределения соединений Cr, Ni, W

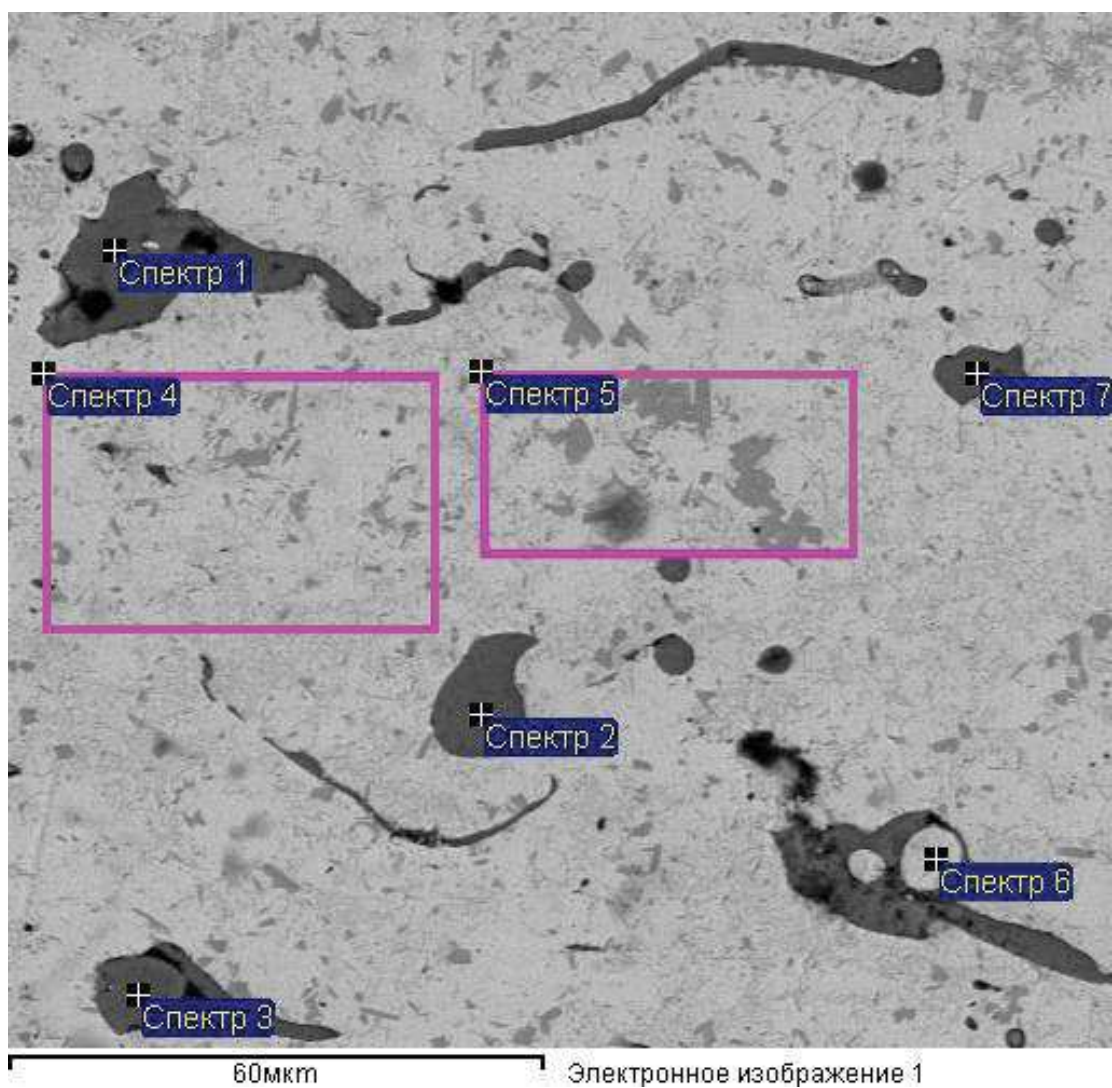


Рис. 6. СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия ПГ-ХН80СР+33 %  $\text{TiO}_2$

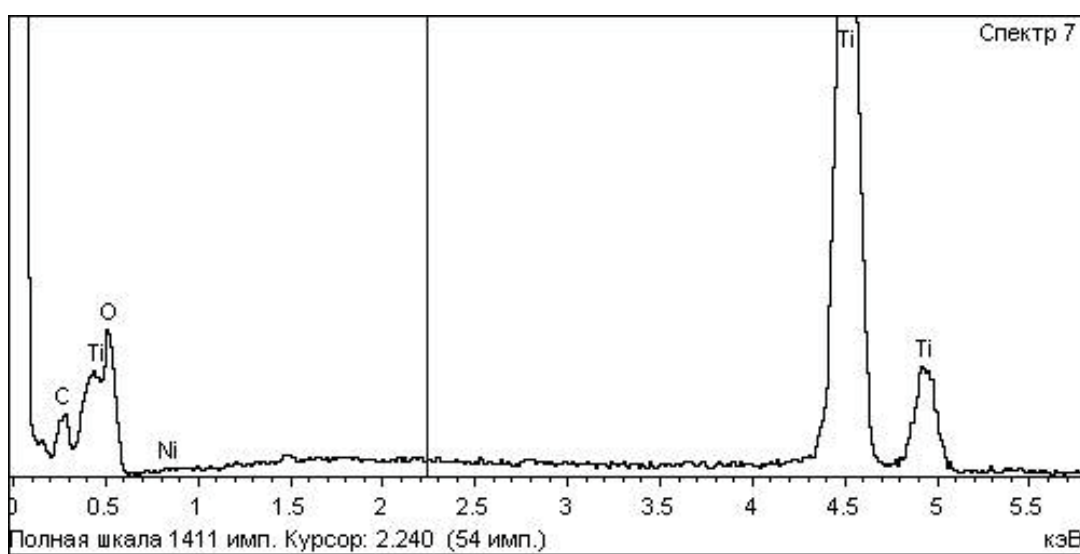


Рис. 7. Дифрактограмма покрытия ПГ-ХН80СР+33 %  $\text{TiO}_2$



Табл. 2

## Содержание химических элементов в участках покрытия, весовые %

Спектр	C	O	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Итог
Спектр 1	15,97	32,77		50,21			1,05	100,00
Спектр 2	12,69	33,91		52,33			1,07	100,00
Спектр 3	10,03	35,07		53,74			1,15	100,00
Спектр 4	4,89		4,35		17,57	4,58	68,61	100,00
Спектр 5	6,13		3,43		26,46	4,21	59,77	100,00
Спектр 6	31,00		3,00	0,40	9,71	4,13	51,75	100,00
Спектр 7	7,40	35,41		55,86			1,33	100,00

Средняя твердость полученных композиционных покрытий, содержащих диоксид титана в качестве упрочняющей фазы, в сравнении со сплавом ПГ-ХН80СР4 без добавок и со сплавом ПС-12НВК-01 приведена на рис. 8.



Рис. 8. Средняя твердость композиционных плазменных покрытий при содержании  $TiO_2$  в смеси порошков для напыления: №1 – 33 %, №2 – 25 %, №3 – 20 %, №4 – 15 %, №5 – сплав ПГ-ХН80СР4 без добавок, №6 – сплав ПС-12НВК-01

Из диаграмм видно, что твердость напыленных композиционных покрытий, содержащих диоксид титана, выше чем у материалов-аналогов. При этом наименьшая средняя твердость наблюдается при содержании  $TiO_2$  равным 15 % и 20 %, а наибольшая – при 25 % керамической фазы. Увеличение средней твердости покрытий составляет 3,3–12,6 % по сравнению с ПГ-ХН80СР4 и 5,8–15,3 % по сравнению с ПС-12НВК-01. Представляет интерес возрастание твердости композиций, содержащих 25 % и 33 % оксидных включений. Это может являться следствием частичного растворения титана в никелевой матрице покрытия, либо перераспределения упрочняющих фаз в покрытии, что требует дальнейших исследований.

Исследования микротвердости полученных покрытий показали довольно случайный разброс значений микротвердости из-за сложного состава самофлюсующихся порошков и большой разницы микротвердости структурных составляющих покрытий из данного материала (рис. 9). Однако, во всех случаях наблюдается резкое падение значений микротвердости при переходе через границу раздела между покрытием и основой.



Рис. 9. Микротвердость композиционных плазменных покрытий в направлении от поверхности к основе:  
 1 – ПГ-ХН80СР4+15 %  $TiO_2$ ; 2 – ПГ-ХН80СР4+20 %  $TiO_2$ ; 3 – ПГ-ХН80СР4+25 %  $TiO_2$ ;  
 4 – ПГ-ХН80СР4+33 %  $TiO_2$ ; 5 – ПГ-ХН80СР4 без добавок; 6 – ПС-12НВК-01

Самые высокие пиковые значения микротвердости наблюдаются в покрытии из сплава ПС-12НВК-01 при попадании индентора в карбид вольфрама. Наименьший разброс значений микротвердости наблюдается в сплаве, содержащем 20 %  $TiO_2$  в исходной смеси порошков, что говорит о незначительной разнице микротвердости структурных составляющих покрытия.

Сравнение средней микротвердости матрицы чистого самофлюса и матрицы покрытий, содержащий диоксид титана, показало отсутствие существенного увеличения значений средней микротвердости (для девяти измерений, нагрузка 100 г) – в первом случае она составила 6429 МПа, во втором – 6477 МПа ( $\approx 57$  HRC в обоих случаях). Средняя микротвердость оксидных частиц в составе покрытия составила 4642 МПа ( $\approx 46$  HRC).

Сформированные покрытия отличаются высокой плотностью и низкой пористостью. Наличие упрочняющих фаз делает их перспективными для использования в качестве износостойких покрытий, что будет являться дальнейшим направлением их исследования.

### Заключение

1. Структура композиционных покрытий, содержащих  $TiO_2$ , представляет собой никелевую матрицу с кристаллизовавшейся карбоборидной фазой, характерной для самофлюсующихся сплавов, а также частицами диоксида титана, имеющих слоистую форму и равномерно распределенных в объеме покрытия, что говорит о достаточном проплавлении всех компонентов напыляемой смеси в плазменной струе.

2. В ходе исследований установлено, что введение добавок диоксида титана в самофлюсующийся сплав положительно влияет на физико-механические свойства плазменных покрытий, в частности твердость. Установлено, что увеличение средней твердости покрытий, содержащих  $TiO_2$ , составляет 3,3–12,6 % по сравнению со сплавом ПГ-ХН80СР4 без добавок и 5,8–15,3 % по сравнению со сплавом ПС-12НВК-01. Увеличение твердости покрытий происходит, предположительно, из-за частичного растворения титана в никелевой матрице покрытия, либо перераспределения упрочняющих фаз в покрытии, что требует дальнейших исследований.

3. Химического взаимодействия частиц оксида с матрицей покрытия по результатам исследований не выявлено и увеличения средней микротвердости никелевой

матрицы покрытия также не наблюдается. В свою очередь, в процессе напыления, оплавления и последующего охлаждения частицы  $TiO_2$  не диссоциируют на структурные составляющие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление/ А. Хасуи, О. Мorigаки // Под ред. В.С. Степанина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 240.
2. Теория и практика газопламенного напыления/ П.А. Витязь [и др.] – Минск.: Навука і тэхніка, 1983. – С. 295.
3. Портной, К.И. Композиционные материалы на никелевой основе/ К.И. Портной, Б.Н. Бабич, И.Л. Светлов. – Москва: Metallurgy, 1979. – С. 264.
4. Калиниченко, А.С. Структурно-фазовый анализ композиционных покрытий из самофлюсующихся никельхромовых порошков, упрочненных оксидом алюминия/ Современные методы и технологии создания и обработки материалов: XI Международная научно-техническая конференция (Минск 14–16 сентября 2016 г.) // А.С. Калиниченко, В.В. Мешкова – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016, №1 (3). – С. 90–93.
5. Калиниченко, А.С. Износостойкость плазменных покрытий из порошковой смеси, содержащей керамическую фазу/ А.С. Калиниченко, В.В. Мешкова, Е.Э. Фельдштейн// Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции/ Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 92–94.
6. Семенов, А.П. Трибологические свойства тугоплавких оксидов и неметаллических соединений при высоких температурах. Часть 1. Оксиды/ А.П. Семенов// Трение и износ. – 2008. – Т.29, №5. – С.531–549.
7. Борисов, Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник/ Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, – 1987 г. – С. 544.
8. Демиденко, Л.М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия/ Л.М. Демиденко– М.: Metallurgy, 1979. – С. 216.
9. Структура границы раздела оплавленное покрытие – сталь/ Н.А. Руденская [и др.]. – Доклады академии наук. – 2011. – Т.441, № 4. – С. 495–498

#### REFERENCES

1. Khasui A., Morigaki O. Naplavka i napyleniye [Surfacing and spraying]/ Per. s yap. V.N. Popova; Pod red. V.S. Stepanina. N.G. Shesterkina. Moscow: Mechanic engineering. 1985. p.240. (in Russian).
2. Vityaz P.A., Ivashko V.S., Manoilo E.D. Teoria i praktika gazoplamnogo napylenia [Theory and practice of gas flame spraying]. Minsk: Science and technology, 1983. p. 295. (in Russian).
3. Portnoy K.I., Babich B.N., Svetlov I.L. Kompozitsionnyye materialy na nikelvovoy osnove [Nickel-based composite materials]. Moscow: Metallurgy, 1979. p.264. (in Russian).
4. Kalinichenko A.S. Strukturno-fasovii analis kompozitsionnykh pokrytii is samoflusuuyshichsia nikelchromovych poroshkov, uprochnennykh oksidom alyminiya [Structural-phase analysis of composite coatings formed from self-fluxing nickel-chromium powders reinforced with aluminum oxide]/ Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: XI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya (Minsk, September 18–20, 2016)// Kalinichenko A.S., Meshkova V.V. — Minsk: PHTI NAS of Belarus, 2016; iss. 1 (3), pp. 90–93. (in Russian).
5. Kalinichenko A.S., Meshkova V.V., Feldshteyn E.E. Iznosostoykost plazmennykh pokrytiy iz poroshkovoy smesi, soderzhashchey keramicheskuyu fazu [Wear resistance of plasma coatings from a powder mixture containing a ceramic phase] // Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii: sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Tomsk, May 24–26, 2018) – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Tomsk Polytechnic University Publishing House], 2018; pp. 92–94. (in Russian).
6. Semenov A.P. Tribologicheskiye svoystva tugoplavkikh oksidov i nemetallicheskih soyedineniy pri vysokikh temperaturakh [Tribological properties of refractory oxides and nonmetallic compounds at high temperatures]. Part 1. Oxides // Friction and wear. 2008. V. 29, iss. 5. pp. 531–549. (in Russian).
7. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N.. Gazotermicheskiye pokrytiya iz poroshkovykh materialov. Spravochnik [Thermal coatings of powder materials. Book of reference]. Kiev: Naukova dumka, 1987. p.544. (in Russian).
8. Demidenko L.M. Vysokoogneupornyye kompozitsionnyye pokrytiya [Highly refractory composite coatings]. – Moscow: Metallurgy, 1979. p. 216. (in Russian).
9. Rudenskaya N.A., Shveikin G.P., Kopysov V.A., Rudenskaya M.V. Struktura granitsy razdela oplavlennoye pokrytiye – stal [The interface structure of the molten coating – steel]. Reports of the Academy of Sciences. – 2011. – V.441, iss. 4. – pp. 495–498. (in Russian).

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 16.07.2020*