

УДК 621.793.71

**В. А. Безрукова\***

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

\**vikabezrukova1995@mail.ru*

Научный руководитель – доц., канд. техн. наук *Е. Е. Корниенко*

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ ПОРОШКОВ $B_4C-Ni$ И $B_4C-Ni-Ti$

Исследованы структура и свойства покрытий из  $B_4C-Ni$  и  $B_4C-Ni-Ti$ , полученных методом воздушного плазменного напыления. Показаны изображения полученных покрытий, также приведен химический состав и значения микротвердости.

*Ключевые слова:* воздушное плазменное напыление, карбид бора, композиционные порошки.

**V. A. Bezrukova**

## THE STRUCTURE FEATURES OF $B_4C-Ni$ AND $B_4C-Ni-Ti$ PLASMA COATINGS

The features of air plasma sprayed  $B_4C-Ni$  and  $B_4C-Ni-Ti$  coatings are investigated. The images of obtained coatings as well as chemical composition and microhardness are shown.

*Keywords:* air plasma spraying, boron carbide, composite powders.

Актуальной проблемой современного материаловедения является разработка износостойких материалов, способных работать в тяжелых условиях эксплуатации. Одним из таких материалов является карбид бора ( $B_4C$ ). Карбид бора характеризуется высокими показателями износостойкости и коррозионной стойкости, а также низкой плотностью и высокой температурой плавления [1; 2]. Данные показатели обуславливают его применение в машиностроении, ядерной физике, химической промышленности и электронике [2].

Существуют различные технологии формирования изделий и покрытий из данного материала. Объемные изделия изготавливают методами плавления под давлением инертного газа [3], горячего и холодного прессования [4], искрового плазменного спекания [5]. Тем не менее из  $B_4C$  непросто изготовить крупные изделия со сложной конфигурацией. В связи с этим часто более целесообразным является нанесение покрытий из данного материала. Покрытия из карбида бора наносят с помощью следующих технологий: вневакуумная электронно-лучевая наплавка [6], HVOF [7], плазменное напыление [8]. На

сегодняшний день плазменное напыление является технологией, позволяющей формировать качественные покрытия достаточно простым и экономичным способом. Из-за высоких твердости и температуры плавления невозможно сформировать качественные покрытия из чистого карбида бора с помощью этой технологии. Решением данной проблемы является создание композиционных порошков на основе  $B_4C$  плакированного или конгломерированного строения. При добавлении материалов, обладающих более высокой пластичностью и теплопроводностью, например Ni, Co, Ti, Al, Cu [1], обеспечивается образование связующей металлической матрицы с равномерно распределенными в ней твердыми частицами карбида бора. Известно, что система, состоящая из частиц карбидов и никеля в качестве металлического связующего, превосходно сочетает в себе высокие показатели износостойкости и способность сохранять механические свойства при высоких температурах. Помимо увеличения пластичности и теплопроводности системы, металлическое связующее способствует также образованию более равномерной микроструктуры, что, в свою очередь, обеспечивает высокие показатели когезии. Также известно, что добавление Ti к порошку карбида бора в качестве поверхностно-активного вещества способствует снижению поверхностного натяжения в покрытиях и, как следствие, увеличению когезии [9].

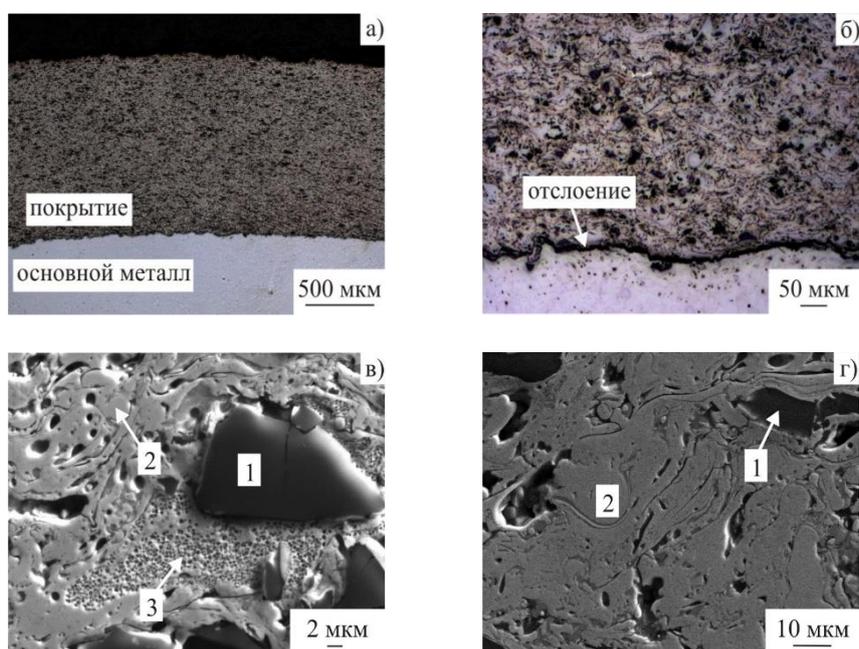
В настоящей работе исследовались структурные особенности плазменных покрытий из  $B_4C-Ni$  и  $B_4C-Ni-Ti$ .

В качестве материала для нанесения покрытий использовали порошки  $B_4C$  (80 ат. % B и 20 ат. % C), плакированный 30 вес. % Ni (30Ni) и гранулированный порошок  $B_4C$  (80 ат. % B и 20 ат. % C) с добавкой 30 вес. % Ni-Ti (30Ni-Ti). При помощи локального химического анализа было обнаружено, что в составе порошка 30Ni, кроме бора, углерода и никеля, есть также незначительное количество фосфора, что связано с методом получения данных композиционных порошков. Размеры частиц порошков находились в диапазоне от 40 до 100 мкм.

При выполнении данной работы использовали технологию воздушного плазменного напыления с распределенным кольцевым вводом порошка. Порошки напыляли на трубы из низкоуглеродистой стали 20 с внутренним диаметром 25 мм и толщиной стенки 3 мм. Напыление покрытий проводили в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН на установке плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50-01». В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовали воздух, в качестве защитного – смесь воздуха и пропан-бутана. Режимы напыления: сила тока – 180 А, напряжение – 265 В, дистанция напыления – 170 мм. Поверхность стальных труб перед напылением подвергали пескоструйной обработке.

В качестве основных методов структурных исследований использовали оптическую и растровую электронную микроскопию. Образцами для структурных исследований, а также измерений микротвердости, выступали поперечные микрошлифы, запрессованные в полимерную матрицу и подготовленные по стандартной методике. В качестве травителя структуры покрытий использовали реактив следующего состава: 10 мл HCl, 0,1 мл HNO<sub>3</sub> и 10 г FeCl<sub>3</sub>. Структурные исследования проводили на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer A1m*. Для исследования порошка и тонкого строения структуры покрытий использовали растровый электронный микроскоп *Carl Zeiss EVO50 XVP*. Определение химического состава частиц порошка и структурных составляющих покрытий проводили с использованием микроанализатора *EDS X-Act*. Для измерения микротвердости структурных составляющих использовали микротвердомер *Wolpert Group 402MVD* с нагрузкой 25 г.

В результате микроструктурных исследований было установлено, что толщина покрытий составляет 1000–1200 мкм. Видно, что покрытия, полученные из порошка 30Ni (на рисунке а), имеют более высокую адгезию с основой, по сравнению с покрытиями, полученными из порошка 30Ni–Ti (на рисунке б).



Изображение микроструктуры покрытий, сформированных из порошка 30Ni (а, в) и порошка 30Ni–Ti (б, г): а, б – оптическая микроскопия; в, г – растровая электронная микроскопия

При помощи оптической микроскопии показано, что микроструктура полученных покрытий, представляет собой металлическую матрицу (2 на рисунках в и г) с распределенными в ней нерасплавившимися частицами (1 на рисунке в и г). Как было показано ранее [10], эти частицы представляют

собой карбид бора. Данные, полученные при помощи микрорентгеноспектрального анализа, также подтверждают, что нерасплавившиеся частицы – это карбид бора. Они имеют в своем составе высокое содержание В и С (таблица ниже).

Результаты локального химического анализа, ат. %

	Содержание химического элемента, ат. %					
	В	С	Ni	Ti	P	O
Покрытие, сформированное из порошка 30Ni						
1 на рисунке <i>в</i>	89,87	10,05	0,08	–	–	–
2 на рисунке <i>в</i>	22,73	8,22	57,71	–	9,22	2,12
3 на рисунке <i>в</i>	–	16,78	55,17	–	17,42	10,64
Покрытие, сформированное из порошка 30Ni-Ti						
1 на рисунке <i>г</i>	90,51	6,01	1,87	1,62	–	–
2 на рисунке <i>г</i>	–	–	50,56	41,88	–	7,57

Также было установлено, что матрица покрытий, полученных из порошка 30Ni, содержит большое количество Ni и В (2 на рисунке *в*, таблица). Согласно анализу двойной диаграммы состояния Ni–В [19], металлическая матрица данных покрытий может состоять из различных боридов никеля (NiB, Ni<sub>2</sub>B и Ni<sub>3</sub>B). Матрица покрытий, полученных из порошка 30Ni-Ti, состоит преимущественно из Ni и Ti (2 на рисунке *г*, таблица). Анализ двойной диаграммы состояния Ni–Ti позволяет предположить, что она представляет собою химическое соединение TiNi [19].

В результате травления покрытий, сформированных из порошка 30Ni, в металлической матрице были выявлены области с эвтектической структурой (3 на рисунке *в*). Микрорентгеноспектральным анализом показано повышенное содержание фосфора в этих областях (таблица). Можно предположить, что структурные особенности этих областей связаны именно с наличием фосфора, который содержится в исходном порошке, так как известно, что одним из самых распространенных методов получения плакированных никелем порошков карбида бора является химическое восстановление Ni из водных растворов его солей гипофосфитом натрия (NaPO<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) [11]. Стоит также отметить, что для исследуемых покрытий характерно наличие оксидов, что может свидетельствовать о недостаточной защите плазменной струи.

В результате локальных измерений микротвердости было установлено, что частицы карбида бора в обоих покрытиях имеют примерно одинаковые значения микротвердости – 30–45 ГПа, матрица 30Ni – 4–5,3 ГПа, 30Ni-Ti – 2,5–5,5 ГПа. Области с эвтектической структурой в покрытиях из 30Ni обладают наименьшими значениями микротвердости – 1,7–2,2 ГПа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бор в ядерной технике / В. Д. Рисованный [и др.] Димитровград: ГНЦ НИИАР, 2011. С. 668.
2. Андриевский Р. А. Микро- и наноразмерный карбид бора: синтез, структура и свойства // Успехи химии. 2012. № 81. С. 549–559.
3. Wang Lily I., Zuhair A. Munir. Formation of MgO-B<sub>4</sub>C composit via a thermit-based combustion reaction // Journal of the American Ceramic Society. 1995. № 78. P. 756–764.
4. Chen M. W. Microstructural characterization of commercial hot-pressed boron carbide ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2005. № 88. P. 1935–1942.
5. Hayun S. Microstructural characterization of spark plasma sintered boron carbide ceramics // Ceramics International. 2010. № 36. P. 451–457.
6. Krivezhenko D. S., Zimoglyadova T. A. Electron-Beam Cladding of Boron Carbide on Low-alloyed Steel at the Air Atmosphere // Applied Mechanics and Materials. 2015. № 698. P. 369–373.
7. Rafiei M., Salehi M. Preparation and oxidation behavior of B<sub>4</sub>C–Ni and B<sub>4</sub>C–TiB<sub>2</sub>–TiC–Ni composite coatings produced by an HVOF process // Ceramics International. 2014. № 40. P. 13599–13609.
8. Zhu H., Niu Y., Lin C. Microstructures and tribological properties of vacuum plasma sprayed B<sub>4</sub>C–Ni composite coatings // Ceramics International. 2013. № 39. P. 101–110.
9. Lin Q., Sui R. Wetting of B<sub>4</sub>C by molten Ni–Ti alloys at 1753 K // Journal of Alloys and Compounds. 2013. № 577. P. 37–43.
10. Безрукова В. А., Корниенко Е. Е., Кузьмин В. И. Структурные особенности плазменных покрытий системы В<sub>4</sub>С–Ni // Актуальные проблемы современной науки: материалы пятой региональной научно-практической конференции (Омск, 15 апреля 2016 г.). Омск: ОмГТУ, 2016. С. 7–11.
11. Лякишева Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. Т. 1. М. : Машиностроение, 1996. С. 992.