

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Б. О. Большаков<sup>1</sup>, А. М. Смыслов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> bobolshakov@gmail.com, <sup>2</sup> smyslovam@yandex.ru

<sup>1</sup> ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В работе представлены результаты разработки металлокерамического композиционного материала для применения в конструкциях уплотнений проточной части паровых турбин, получаемого методом порошковой металлургии путем твердофазного спекания. Установлено, что реализованные условия формообразования приводят к формированию в структуре протяженных зернограничных пор и образованию тонкодисперсных прослоек нитрида бора между формируемыми металлическими зернами, обеспечивающие в комплексе высокий уровень истираемости материала. Приведены данные по физико-механическим свойствам разработанного металлокерамического композиционного материала.

**Ключевые слова:** металлокерамический композитный материал; микроструктура; механические свойства; истираемость.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность, безопасность и надежность работы паровых турбин тепловых электростанций неразрывно связана с качеством и типом применяемых уплотнений, выбор которых основан на совокупности данных по расходным, динамическим и эксплуатационным характеристикам [1].

Известно, что уменьшение зазора между статорными и роторными элементами способствует повышению эффективности турбоагрегата и снижению расхода топлива [2, 3]. Однако в процессе эксплуатации турбин в случаях колебания ротора при прохождении критических частот вращения, при работе на нерасчетных режимах и др, происходит соприкосновение вращающихся и неподвижных элементов проточной части, что приводит к их взаимному интенсивному износу.

Наиболее рациональным решением устранения этих явлений является применение специальных материалов, которые легко истираются при контакте с гребешками лопаток.

Основой разработок таких материалов служит порошковая металлургия, которая позволяет вводить в состав исходной шихты синтетические и природные кристаллические материалы с графитоподобной структурой, относящиеся к категории «твердой» смазки [4-8]. При этом, подавляющее число работ направлено на разработку легко истираемых материалов и технологии их нанесения в качестве уплотнений на статорные элементы турбин путем газотермического напыления.

В данной работе представлены результаты разработки объемного металлокерамического композиционного легко истираемого материала, получаемого путем твердофазного спекания.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уплотнения проточной части паровых турбин работают достаточно в сложных эксплуатационных условиях, а именно наличие коррозионно-эрозионной среды и повышенной температуры. В качестве материала основы был выбран порошок корро-

зионностойкой стали Fe-13%Cr-2%Mo с фракционностью от 10 до 60 мкм полученный в соответствии с ГОСТ 13084-84. С учетом предполагаемых температурных режимов эксплуатации уплотнений из разрабатываемого материала, в качестве второго компонента шихты, обеспечивающего снижение коэффициента трения и обеспечивающего требуемые показатели истираемости, был выбран мелкодисперсный порошок нитрида бора BN по ТУ.У 26.8-0022226-007-2003. Время перемешивания составов определялось опытным путем из условия равномерного распределения компонентов по объему шихты. Полученная порошковая смесь подвергалась холодному прессованию в формы прямоугольного сечения. Спекание проводили в электропечах в воздушной атмосфере при температуре 1200 °С. Время спекания 2 ч.

Плотность образцов определяли гидростатическим взвешиванием.

Микроструктура образцов изучалась на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV.

Твердость образцов определяли методом Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012. Испытания на статическое растяжение проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982. Скорость перемещения траверсы в процессе испытаний – 1 мм/мин. Ударную вязкость определяли на копре с вертикально-падающим грузом Instron Ceast 9350. Запасенная энергия удара – 50 Дж.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена микроструктура разработанного металлокерамического ком-

позиционного материала. Наблюдаемая в плоскости шлифа структура представляет собой совокупность порового пространства и сформировавшегося ансамбля металлических частиц. В структуре наблюдаются границы зерен, дисперсные поры правильной формы и множественные протяженные зернограничные поры (рис. 1 а, б). Прослеживаемый, по характерному декорированию границ, размер зерен (составляет 10...60 мкм) соответствует гранулометрическому составу использованному металлическому порошку ПХ13М2. При этом, детальные исследования границ зерен методом растровой электронной микроскопии (рис. 1 в, г) выявили наличие тонких, толщиной 0,1-0,7 мкм, дисперсных прослоек нитрида бора BN, располагающиеся между металлическими зёрнами. Исследование формы и размеров крупных несплошностей, в совокупности с известными данными по химической инертности частиц нитрида бора [9] позволяют предположить, что наблюдаемые протяженные зернограничные поры являются областями с повышенной концентрацией BN, которые в процессе подготовки образца к металлографическому анализу удалились вместе с абразивом. Описанные особенности структуры обуславливают высокие показатели истираемости разрабатываемого композиционного материала.

Кроме этого, в структуре наблюдаются частицы нитрида бора, расположенные в центральной части сформировавшихся металлических зерен (рис. 2). Подобные особенности строения обусловлены протеканием процессов зернограничной диффузии при спекании.

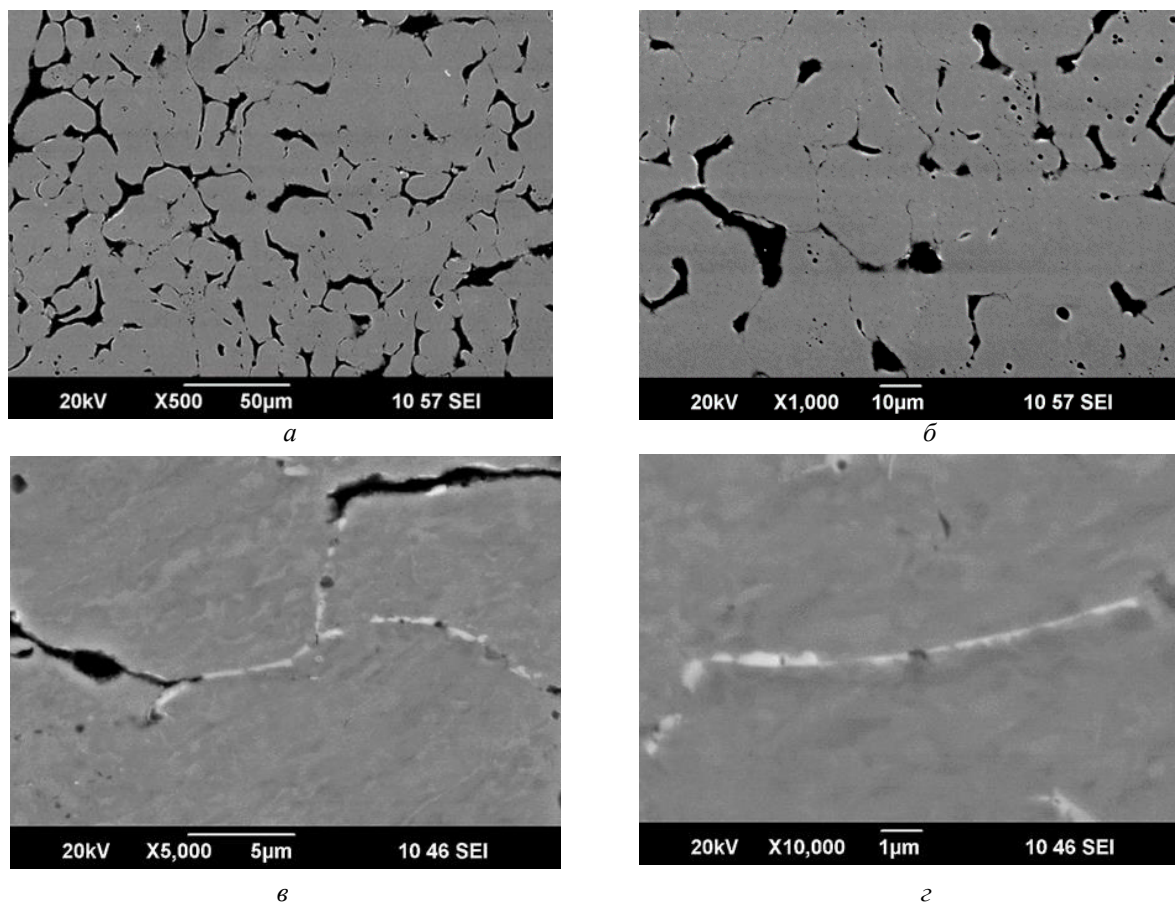


Рис. 1. Микроструктура разработанного металлочермического композиционного материала

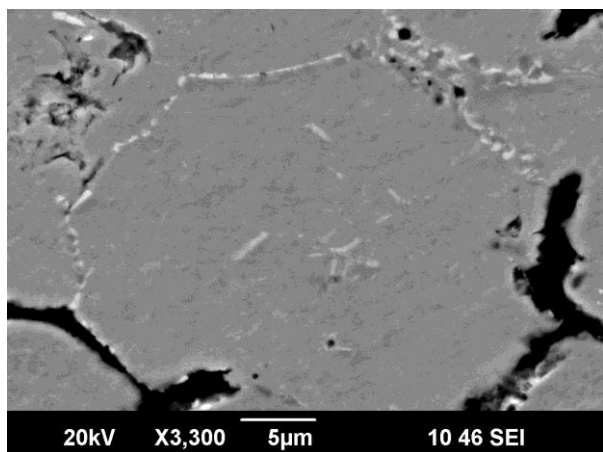
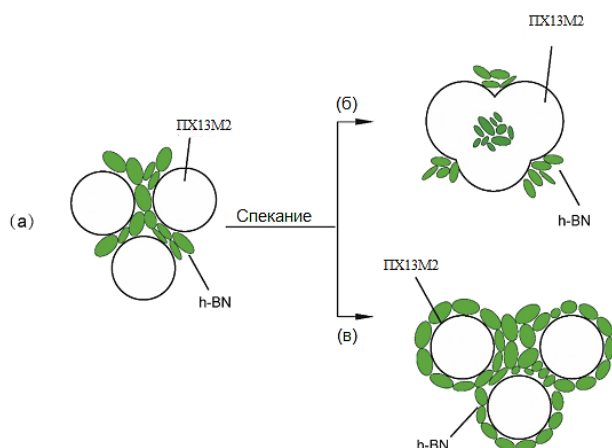


Рис. 2. Структура сформировавшихся при спекании металлических зерен

Описанные выше особенности строения позволили сформулировать феноменологическую модель структурообразования, разрабатываемого металлочермического композиционного материала (рис. 3). В процессе подготовки шихты происходит равно-

мерное распределение порошковых компонентов по всему объему заготовки (архитектура шихты схематично представлена на рис. 3, а). Вследствие особенностей структуры и свойств частиц нитрида бора с гексагональной структурой, в процессе прессования происходит частичное перераспределение с образованием областей как с повышенной, так и с пониженной их концентрацией. При спекании в областях материала с пониженной концентрацией BN между частицами металлического порошка будут образовываться так называемые «шейки» фронта спекания, развиваться процессы зернограничной диффузии с образованием прочной взаимосвязи (рис. 3, б). В областях с повышенной концентрацией нитрида бора развитие описанных выше процессов невозможно вследствие отсутствия контактирующих поверхностей между металлическими частицами (рис. 3, в).



**Рис. 3.** Феноменологическая модель структурообразования металлокерамического композиционного материала ПХ13М2-ВН

В табл. 1 представлены сводные данные по основным физико-механическим свойствам разработанного материала из которых видно его полное соответствие предъявляемым к уплотнениям проточной части паровых турбин требованиям.

Таблица 1

**Основные физико-механические свойства разработанного композиционного материала**

Наименование	Требуемые значения	Экспериментальные значения
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,5...6,0	5,9
Твердость, НВ	≤ 110	65...85
Предел прочности ( $\sigma_B$ ) при температуре 600 °С, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	≥ 49 (5)	88...118 (9...12)
Ударная вязкость (КС), кДж/м <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )	≤ 98,066 (1)	33...65 (0,34...0,66)
Коэффициент термического линейного расширения ( $\alpha$ ) при 600 °С 10 <sup>-6</sup> /К <sup>-1</sup>	≤ 14	12,2...13,1

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Введение в состав исходной шихты ПХ13М2 мелкодисперсного ВН с графитоподобной структурой приводит к формированию регламентируемой протяженной зернограничной пористости с повышенным содержанием нитрида бора.

Обеспечение требуемого сочетания прочности и истираемости композиционного материала ПХ13М2-ВН достигается за счет образования тонкодисперсных прослоек нитрида бора между формируемыми в процессе спекания металлическими зернами.

*Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УГАТУ».*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Неуймин В. М. Уплотнения проточной части паровых турбин (обзор) // Теплоэнергетика. 2018. №3. С. 3-14. [V. M. Neumin, «Steam Turbine Flow Path Seals (a Review)», (in Russian), in *Теплоэнергетика*, vol.3, pp. 3-14, 2018].
2. J.T. DeMasi-Marcin, D.K. Gupta. Protective coatings in the gas turbine engine // *Surf. Coat. Technol.* vol. 68–69, pp. 1–9, 1994.
3. T.N. Rhys-Jones. The use of thermally sprayed coatings for compressor and turbine applications in aero engines // *Surf. Coat. Technol.* vol. 42, 1990, pp. 1–11.
4. P. Sutor. Solid lubricants: overview and recent developments // *MRS Bull.* 16 (1991) pp. 24–30.
5. J. Lancaster. Solid Lubricants, in: *CRC Handb. Lubr.* // CRC Press, 1988: pp. 269–290.
6. E.L. McMurtrey. *Lubrication Handbook for the Space Industry - Part A, Solid Lubricants*, NASA TM-86556, Marshall Space Flight Center, 1985.
7. H.E. Sliney. Solid lubricant materials for high temperatures - A review // *Tribol. Int.* 15, 1982, pp. 303–315.
8. A.R. Lansdown. *Molybdenum Disulphide Lubrication* // *Tribology Series*, 35, Elsevier Science, Amsterdam, 1999.
9. N. Kostoglou, K. Polychronopoulou, C. Rebholz. Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets // *Vacuum.* vol. 112, 2015, pp 42-45.

**ОБ АВТОРАХ**

**БОЛЬШАКОВ Борис Олегович**, вед. инж. ООО НПП «Уралавиаспезтехнология». Магистр. техн. и технол. по спец. материаловед. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. металлокерамических уплотнений.

**СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович**, проф. каф. тех.-нол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей ЛА (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

**METADATA**

**Title:** Structure and properties of the metal-ceramic composite material for steam turbine flow channel seals

**Authors:** B. O. Bolshakov<sup>1</sup>, A. M. Smyslov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> LLC Scientific and production enterprise «Uralaviaspeztehnologiya», Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> bobolshakov@gmail.com, <sup>2</sup> smyslovam@lyandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (22), pp. 21-25, 2020. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The paper presents the results of the development of a metal-ceramic composite material for use in the design of seals of the flow part of steam turbines, obtained by powder metallurgy by solid-phase sintering. It is established that the implemented conditions of forming lead to the formation of extended grain boundary pores in the structure and the formation of fine-dispersed layers of boron nitride between the formed metal grains, which provide a high level of material abrasion in the complex. Data on the physical and mechanical properties of the developed metal-ceramic composite material are presented.

**Key words:** metal-ceramic composite material; microstructure, mechanical properties, abrasability.

**About authors:**

**BOLSHAKOV, Boris Olegovich**, Master of Technics & Technology (UGATU, 2012).

**SMYSLOV, Anatoly Mikhailovich**, Prof., Dept. of Engineering technology. Dipl. Engineer (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. (Ufa, 1993).