



МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПРОСЛОЕК НИТРИДА БОРА В ПОРОШКОВЫХ КОМПАКТАХ PCH13M2-BN

MECHANISM OF FORMATION OF NANODISPERSED BORON NITRIDE LAYERS IN PCH13M2-BN POWDER COMACTS

Б.О.Большаков¹, вед. инженер, (ORCID: 0000-0002-5945-7123), Р.Ф.Галиакбаров¹, зам. директора, (ORCID 0000-0002-4966-8437), А.М.Смыслов², д.т.н., проф., (ORCID 0000-0003-3530-8833) / bobolshakov@gmail.com
B.O.Bolshakov¹, Leading Engineer, R.F.Galiakbarov¹, Associate Director, A.M.Smyslov², Doct. of Sc. (Technical), Prof.

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.1.36.42

Получено: 30.11.2020 г.

В работе рассмотрен вопрос формирования структуры порошковых компактов PCH13M2-BN, полученных твердофазным вспеканием. Представлены механизмы формирования нанодисперсных прослоек BN по границам зерен компактов и феноменологическая модель формирования областей с повышенной концентрацией керамических частиц в объеме материала.

This paper considers formation of PCH13M2-BN powder compact structure obtained by solid-phase sintering. The mechanism of the formation of nanodispersed BN interlayers along the grain boundaries of compacts and a phenomenological model of the formation of regions with the increased concentration of ceramic particles in the bulk of the material are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы повышения надежности, стабильности и экономичности паровых турбин различной мощности неразрывно связаны с применяемыми в их конструкциях типами уплотнений [1, 2]. Накопленный мировой опыт эксплуатации паровых турбин с сотовыми, щеточными уплотнениями и уплотнениями, наносимыми газотермическим напылением, свидетельствует о необходимости разработки нового класса истираемых материалов на металлической основе с дисперсными добавками соединений, относящихся к категории твердой смазки (MoS₂, BaF₂, CaF₂, h-BN и др.) [3-10]. При этом наиболее перспективным подходом равномерного введения дисперсных добавок в объем формируемых изделий является использование технологии порошковой металлургии.

Из всего разнообразия неметаллических соединений, относящихся к твердой смазке, хорошими

смазывающими способностями в условиях повышенной влажности и возможностью применения в интервале температур до 700 °С обладает h-BN [11, 12].

Известны работы [13-18], в которых авторы оценивали влияние концентрации гексагонального нитрида бора на механические и трибологические свойства композиционных материалов на различной основе. Установлено, что введение нитрида бора в состав материалов приводит к снижению трения при высоких нагрузках и скоростях [13-15, 17], h-BN обладает низкой адгезионной взаимосвязью с матрицей [15], его смазывающая способность ниже, чем у графита, вследствие большей по величине силе Ван-дер-Ваальса между слоями кристаллической решетки [16, 18]. В ряде работ [1, 19] приводятся сведения о достижении уникального сочетания механических и эксплуатационных свойств композиционных материалов с добавками нитрида бора, позволяющие рассматривать их в качестве

¹ Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология" / Scientific and production enterprise "Uralaviaspeztehnologiya".
² Уфимский государственный авиационный технический университет / Ufa State Aviation Technical University.



материала уплотнений для проточной части паровых турбин.

Однако вопросы формирования структуры композиционных материалов с добавками h-BN и ее взаимосвязь с эксплуатационными свойствами остаются не вполне изученными и являются предметом обсуждения среди ученых.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было отмечено выше, разработка композиционного материала с добавками нитрида бора направлена на последующее его применение в конструкциях истираемых уплотнений паровых турбин. С учетом условий работы таких уплотнений для материала основы выбран порошок коррозионно-стойкой стали Fe-13%Cr-2%Mo с фракционностью от 10 до 80 мкм, полученный в соответствии с ГОСТ 13084-84. В качестве дисперсного наполнителя был выбран порошок гексагонального нитрида бора BN, изготовленный по ТУ.У 26.8-00222226-007-2003. Диаметр частиц нитрида бора составлял от 1 до 10 мкм, толщина частиц от 0,7 до 2 мкм.

Изучение влияния концентрации порошка BN в исходной порошковой шихте на процесс формирования структуры компактов проводилось на образцах следующего состава:

- Состав "1" – прессованные заготовки из чистого порошка ПХ13М2;
- Состав "2" – порошок ПХ13М2 + 0,5% BN;
- Состав "3" – порошок ПХ13М2 + 1% BN;
- Состав "4" – порошок ПХ13М2 + 2% BN;
- Состав "5" – порошок ПХ13М2 + 4% BN;

- Состав "6" – порошок ПХ13М2 + 4,5% BN;
- Состав "7" – порошок ПХ13М2 + 5% BN;
- Состав "8" – порошок ПХ13М2 + 6% BN.

Исходные порошковые компоненты смешивались и подвергались тщательному перемешиванию. Время перемешивания составов определялось опытным путем из условия равномерного распределения компонентов по объему шихты. Полученная порошковая смесь подвергалась холодному прессованию в формы прямоугольного сечения 50×10×10 мм. Спекание компактов проводили в электропечах в воздушной атмосфере при температуре 1200 °С. Время спекания 2 ч.

Микроструктура образцов изучалась на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV и Tescan Lira 3. Количественный анализ проводили с использованием стандартных методик обсчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 представлена микроструктура композиционных компактов с различным содержанием нитрида бора. На полированной поверхности всех исследуемых образцов наблюдаются поры различной формы и размеров. В структуре компакта без нитрида бора (рис.1а) поры имеют глобулярную форму и преимущественно расположены по границам зерен, что свидетельствует о недостаточности прикладываемого усилия при прессовании для формирования более плотной структуры, вследствие возникновения большой по величине силы трения между металлическими частицами и, как следствие, ограниченности протекания процессов диффузии при последующем спекании.

INTRODUCTION

The higher reliability, stability and efficiency of steam turbines of various capacities are inextricably linked with the types of seals used in their designs [1, 2]. The accumulated world experience in operation of steam turbines with honeycomb and brush seals and seals applied by thermal spraying indicates the need to develop a new class of abrasive metal-based materials with dispersed additives of compounds belonging to the category of solid lubricants (MoS₂, BaF₂, CaF₂, h-BN and others) [3-10]. At the same time, the most promising approach for the uniform

introduction of dispersed additives into the volume of the formed products is the use of powder metallurgy technology.

Of the whole variety of non-metallic compounds related to solid lubricants, h-BN possesses good lubricity under conditions of high humidity and a possibility of application in the temperature range up to 700 °C [11, 12].

Known are the works [13-18] where the authors evaluated the effect of concentration of hexagonal boron nitride on the mechanical and tribological properties of composite materials on different bases. It has been

established that the introduction of boron nitride into the composition of materials leads to decreasing of friction at high loads and speeds [13-15, 17], h-BN has a low adhesive relationship with the matrix [15], its lubricity is lower than that of graphite, due to the higher van der Waals force between the layers of the crystal lattice [16, 18]. A number of works [1, 19] provide information on achievement of a unique combination of mechanical and operational properties of composite materials with boron nitride additives, allowing them to be considered as a sealant for the flow path of steam turbines.

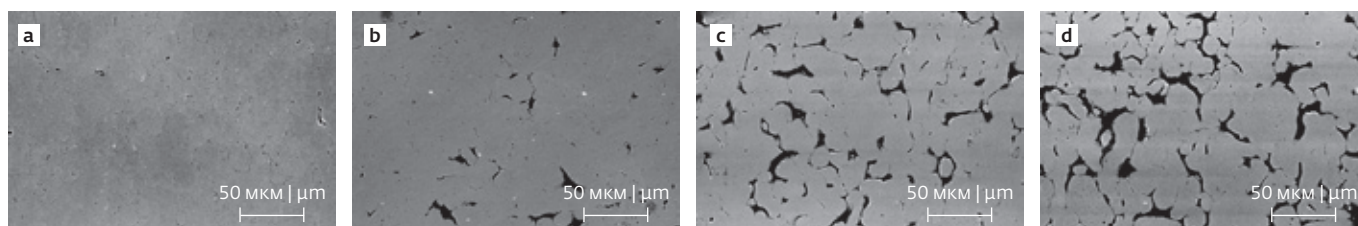


Рис.1. Микроструктура исследуемых компактов с различным содержанием нитрида бора: а – 0% BN; б – 1% BN; в – 4% BN; д – 6% BN
Fig.1. Microstructure of the studied compacts with different content of boron nitride: а – 0% BN; б – 1% BN; в – 4% BN; д – 6% BN

Введение в состав исходной шихты нитрида бора приводит к формированию в микроструктуре протяженных зернограничных пор (рис.1б, с, д), причем чем выше содержание нитрида бора, тем больше объемная доля и размер пор. Механизм образования наблюдаемых протяженных зернограничных пор отличается от классического представления, описанного в работах [20–23]. Ввиду различной насыпной плотности у металлического порошка ПХ13М2 и нитрида бора, объем замешиваемых компонентов в шихте сопоставим. С учетом этого, в совокупности с химической инертностью и низкой адгезионной способностью нитрида бора, можно предположить, что наблюдаемые в микроструктуре протяженные зернограничные поры являются областями с повышенной концентрацией твердой смазки, которая удаляется вместе с абразивом при подготовке объекта исследования к металлографическому анализу. Увеличение объемной доли пор с повышением содержания нитрида бора в составе исходной шихты от 0 до 6% по массе составляет от 3,5 до 17% соответственно.

Исследования в режиме фазового контраста микроструктуры компактов с различным содержанием нитрида бора при большем увеличении выявили наличие дисперсных наноразмерных, толщиной 20...200 нм, прослоек нитрида бора по границам зерен (рис.2). Причем, на отдельных границах зерен наблюдается ярко выраженная фрагментация частиц h-BN (рис.2с). Кроме этого, частицы h-BN наблюдаются и в теле сформировавшихся при спекании металлических зерен.

Обнаруженные особенности строения компактов с введением в состав исходной порошковой шихты h-BN свидетельствуют о развитии процессов диффузионного массопереноса между металлическими частицами при спекании по различным механизмам.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные по изменению микроструктуры компактов с увеличением содержания нитрида бора позволяют рассмотреть вопрос ее формирования,

However, the formation of the composite material structure with h-BN additives and its relationship with the performance properties remain not fully understood and are the subject of discussion among scientists.

MATERIALS AND RESEARCH METHODS

As noted above, the development of a composite material with boron nitride additives is aimed at its subsequent use in the construction of abraded seals for steam turbines. Taking into account the operating conditions of such seals, the base material for the powder of corrosion-resistant steel Fe-13% Cr-2%

Mo with a fractionation of 10 to 80 microns, obtained in accordance with GOST 13084-84, was selected. The powder of hexagonal boron nitride BN prepared according to TU 26.8-00222226-007-2003 was chosen as dispersed filler. The boron nitride particle diameter varied from 1 to 10 μm and particle thickness was within 0.7–2 μm.

The study of the influence of BN powder concentration in the initial powder charge on the formation of the compact structure was carried out on samples of the following composition:

- Composition "1" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder;
- Composition "2" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder + 0,5% BN;
- Composition "3" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder + 1% BN;
- Composition "4" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder + 2% BN;
- Composition "5" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder + 4% BN;
- Composition "6" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder + 4,5% BN;
- Composition "7" – pressed blanks made of pure ПХ13М2 powder + 5% BN;

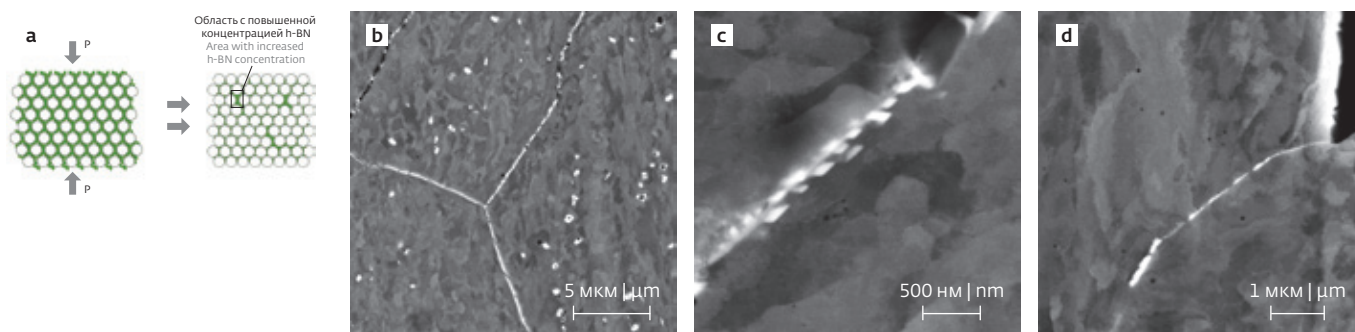


Рис.2. Внешний вид дисперсных прослоек нитрида бора: а и b – общий вид; с – фрагментация частиц по границам зерен; d – расслаивание частиц по границам зерен

Fig.2. Appearance of dispersed boron nitride interlayers: a and b – general views; c – fragmentation of particles along grain boundaries; d – delamination of particles along grain boundaries

предварительно разделив поставленную задачу на две составляющие: 1 – влияние деформации при прессовании, 2 – влияние высокой температуры при спекании.

На рис.3 представлена феноменологическая модель влияния деформации на формирование структуры компактов. Частицы нитрида бора, вследствие своей природной инертности, обладают низкой адгезионной способностью [24] и не могут вступить в реакцию с металлическим порошком ПХ13М2. При прессовании часть равномерно распределенных частиц h-BN в объеме шихты оказывает "смазывающий эффект", способствуя более плотному прилеганию частиц металлического порошка друг к другу. При этом частицы нитрида бора в условиях постепенного уплотнения материала частично подвержены либо прямому быстрому вытеснению в более свободные зоны пониженной плотности, где развитие процессов деформации не началось из-за

недостаточности прикладываемого усилия, либо постепенному медленному вытеснению за счет разрушения взаимосвязи крайних, граничащих с металлическими частицами, слоев (расслаивание частиц нитрида бора (рис.4)). В конечном итоге направленное движение частиц нитрида бора в процессе прессования приводит к формированию в объеме компактов закрытой зернограничной пористости, заполненной частицами h-BN (области с повышенной концентрацией h-BN). При этом чем выше содержание нитрида бора в исходной шихте, тем больше объемная доля зернограничных пор.

При спекании формирование структуры происходит по модели, описанной в работе [25]. На границах раздела, в которых имеются точечные контакты металлических частиц друг с другом, или толщина нитридной прослойки настолько мала, что вследствие термического расширения порошка ПХ13М2 возможно их соприкосновение друг с другом,

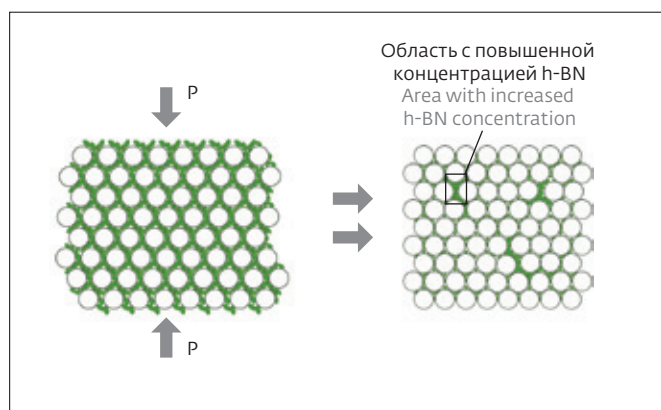


Рис.3. Феноменологическая модель влияния деформации на структурообразование компактов

Fig.3. Phenomenological model of the influence of deformation on the structure formation of compacts

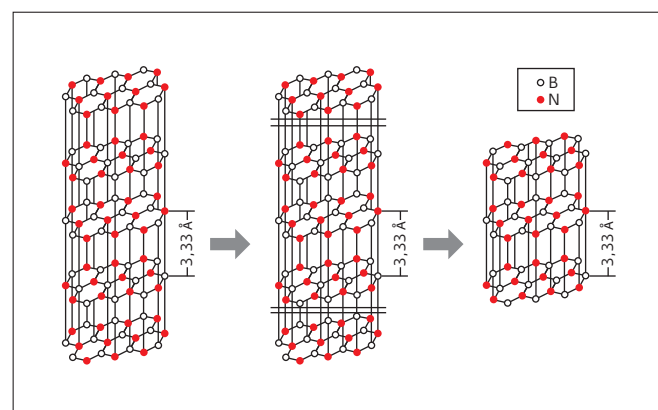


Рис.4. Схематическое изображение процесса расслаивания частиц нитрида бора

Fig.4. Schematic representation of the boron nitride particles delamination

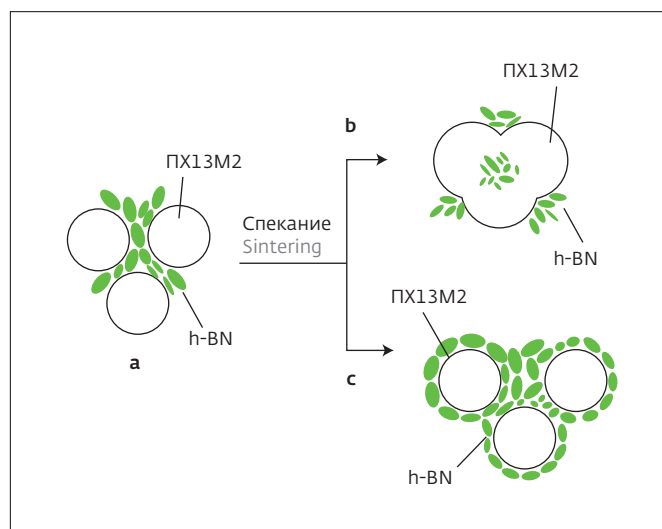


Рис.5. Феноменологическая модель структурообразования при спекании

Fig.5. Phenomenological model of the structure formation during sintering

развиваются процессы диффузионного массопереноса, происходит образование перемычек спекания и слияние металлических частиц с образованием более крупных зерен. При этом возможно частичное поглощение частиц h-BN растущими металлическими зернами (рис.2 и 5b). По границам раздела с большим содержанием керамических частиц и в областях с повышенной концентрацией нитрида бора развитие процессов массопереноса и рекристаллизации блокируется. Вследствие

этого, в объеме компактов создаются ослабленные границы, которые и обуславливают высокие показатели истираемости [1, 19].

Таким образом, введение в состав исходной шихты мелкодисперсного порошка нитрида бора позволяет управлять прочностными свойствами границ зерен, формируемыми в процессе спекания, за счет направленного блокирования развития процессов диффузии при спекании, и, как следствие, достигать необходимого по условиям эксплуатации сочетания прочности и истираемости композиционного материала PX13M2-BN.

ВЫВОДЫ

Введение в состав порошковых компактов PX13M2 мелкодисперсного h-BN с графитоподобной структурой приводит к формированию в процессе деформации протяженной закрытой зернограничной пористости, заполненной частицами нитрида бора.

Деформационная обработка исходной шихты порошковых компактов PX13M2-BN приводит к образованию дисперсных наноразмерных, толщиной 20...200 нм, прослоек нитрида бора по границам зерен за счет частичного расслоения частиц h-BN.

В процессе спекания, вследствие развития процессов диффузионного массопереноса, происходит частичное поглощение растущими металлическими зернами дисперсных частиц h-BN.

Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП "Нанотех" ФГБОУ ВО "УГАТУ".

- Composition "8" – pressed blanks made of pure PX13M2 powder + 6% BN.

The original powder components were put together and thoroughly mixed. The mixing time of the compositions was determined empirically from the condition of the uniform distribution of the components over the volume of the charge. The resulting powder mixture was cold pressed into rectangular shapes of 50×10×10 mm. The compacts were sintered in electric furnaces in air at a temperature of 1,200 °C. The sintering time was 2 hours.

The sample microstructure was studied using a JSM-6490LV scanning

electron microscope and Tescan Lira 3. The quantitative analysis was performed using standard counting techniques.

RESULTS

Figure 1 illustrates the microstructure of composite compacts with different contents of boron nitride. Pores of various shapes and sizes are observed on the polished surface of all studied samples. In the structure of a compact without boron nitride (Fig.1a), the pores have a globular shape and are predominantly located along the grain boundaries which indicates that the applied force during pressing is insufficient for the formation of a

denser structure, due to appearance of a large friction force between metal particles and, as a consequence, the limited flow of diffusion processes during subsequent sintering.

The addition of boron nitride into the initial charge leads to the formation of extended grain-boundary pores in the microstructure (Fig.1b, c, d), and the higher the boron nitride content, the larger the volume fraction and pore size. The mechanism of formation of the observed extended grain-boundary pores differs from the classical concept described in [20–23]. Due to the different bulk density of the PX13M2 metal powder and boron



ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Большаков Б.О., Галиакбаров Р.Ф., Смыслов А.М., Кулешов А.С., Усачев К.М.** Металлокерамический композиционный материал для конструкций надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин // *Электрические станции*. 2020. № 5. С. 25–30.
2. **Жуков С.В., Кистойчев А.В., Шапошников К.В., Урьев Е.В.** Анализ использования сотовых уплотнений в конструкциях паровых турбин // *Электрические станции*. 2013. № 2. С. 27–31.
3. **Ding C.H., Liu C.H., Yang Z.M., Wang Y.P., Sun Z.B., Yu L.** Effect of size refinement and distribution of lubricants on friction coefficient of high temperature selflubricating composites // *Compos Sci Technol*. 2010. V. 70. PP. 1000–1005.
4. **Kato H., Takama M., Iwai Y., Washida K., Sasaki Y.** Wear and mechanical properties of sintered copper–tin composites containing graphite or molybdenum disulfide // *Wear*. 2003. V. 255. PP. 573–580.
5. **Sutor P.** Solid lubricants: overview and recent developments // *MRS Bull*. 16 (1991). PP. 24–30.
6. **Clauss F.J.** Low-Friction Inorganic Solids, in: *Solid Lubr. Self-Lubricating Solids*. Elsevier, 1972. PP. 15–41.
7. **Lancaster J.** Solid Lubricants, in: *CRC Handb. Lubr.*, CRC Press, 1988. PP. 269–290.
8. **McMurtrey E.L.**, *Lubrication Handbook for the Space Industry – Part A, Solid Lubricants*, NASA TM-86556, Marshall Space Flight Center, 1985.
9. **Sliney H.E.** Solid lubricant materials for high temperatures – A review. *Tribol. Int.* 15 1982. PP. 303–315.
10. **Lansdown A.R.** Molybdenum Disulphide Lubrication. *Tribology Series*, 35, Elsevier Science, Amsterdam, 1999.
11. **Lansdown A.R.** High temperature lubrication. *Mechanical Engineering Publications*; 1994.
12. **Saito T., Honda F.** Chemical contribution to friction behavior of sintered hexagonal boron nitride in water // *Wear*. 2000. V. 237. PP. 253–60.
13. **Du L., Huang C., Zhang W., Li T., Liu W.** Preparation and wear performance of NiCr/Cr₃C₂–NiCr/hBN plasma sprayed composite coating. *Surf Coat Technol*. 2011. V. 205. PP. 3722–3729.
14. **Tyagi R., Xiong D., Li J.** Effect of load and sliding speed on friction and wear behavior of silver/h-BN containing Ni-base P/M composites // *Wear*. 2011. V. 270. PP. 423–430.
15. **Chen B., Bi Q., Yang J., Xia Y., Hao J.** Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites. *Tribol Int.* 2008. V. 41. PP. 1145–1152.
16. **Tyagi R., Xiong D., Li J., Dai J.** High-temperature friction and wear of Ag/h-BN containing Ni-based composites against steel. *Tribol Lett.* 2010. V. 40. PP. 181–186.
17. **Mahathanabodee S., Palathai T., Raadnuai S., Tong-sri R., Sombatsompop N.** Dry sliding wear behavior of SS316L composites containing h-BN and MoS₂ solid lubricants. *Wear*. 2014. V. 316. PP. 37–48.
18. Gisele Hammes, Kelen Juliane Mucelin, Priscila da Costa Gonçalves, Cristiano Binder, Roberto Binder,

nitride, the volume of the mixed components in the charge is comparable. Taking it into account, together with the chemical inertness and low adhesion of boron nitride, it can be assumed that the extended grain-boundary pores observed in the microstructure represent the areas with an increased concentration of solid lubricant, which is removed together with the abrasive when preparing the object of study for metallographic analysis. An increase in the volume fraction of pores with an increase in the boron nitride content in the composition of the initial charge from 0 to 6% by weight is from 3.5% to 17%, respectively.

The studies of the microstructure of compacts with different contents of boron nitride at higher magnification performed in the phase contrast mode revealed a presence of dispersed nanosized 20...200 nm thick boron nitride interlayers along the grain boundaries (Fig.2). Moreover, a pronounced fragmentation of h-BN particles in separate grain boundaries is observed (Fig.2c). In addition, h-BN particles are also observed in the body of metal grains formed during sintering.

The discovered structural features of compacts with the introduction of h-BN into the initial powder mixture indicate the development of diffusion

mass transfer between metal particles during sintering that occurs by various mechanisms.

DISCUSSIONS

The data obtained on the change in the microstructure of compacts with an increase in the boron nitride content allow us to consider the issue of its formation, having previously divided the task into 2 components: 1 – the effect of deformation during pressing, 2 – the effect of high temperature at sintering.

Figure 3 illustrates a phenomenological model of the effect of deformation on the structure formation of compacts. Due to their natural



- Rolf Janssen, Aloisio Nelmo Klein, José Daniel Biasoli de Mello. Effect of hexagonal boron nitride and graphite on mechanical and scuffing resistance of self lubricating iron based composite // *Wear*. 2017. V. 376–377. PP. 1084–1090.
19. **Большаков Б.О., Галиакбаров Р.Ф., Смыслов А.М., Лисянский А.С., Усачев К.М.** Металлокерамический композитный материал для надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин // *Вестник УГАТУ*. 2019. Т. 23. № 4. С. 11–17.
 20. **Exner H., Petzow G.** Sintering and rearrangement during sintering of glass spheres Sintering and catalysis. New York: Plenum press, 1976. PP. 279–293.
 21. **Shinohara N., Okumiya M., Hotta T.** Morphological changes in processrelated large pores of granular compacted and sintered alumina. *J. Amer. Ceram. Soc.* 2000. V. 87. No. 7. PP. 1633–1640.
 22. **Бальшин М.Ю.** Порошковое металловедение. М.: Металлургиздат, 1948, 332 с.
 23. **Liniger E., Raj R.** Packing and sintering of twodimensional structures made from bimodal particle size distributions // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1987. V. 70. No 11. PP. 843–849.
 24. **Kostoglou N., Polychronopoulou K., Rebholz C.** Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. *Vacuum*. 2015. V. 112. PP. 42–45.
 25. **Ting Li, Danqing Yi, Jun Hu, Jiao Xu, Junlei Liu, Bin Wang.** Surface modification of h-BN and its influence on the mechanical properties of CuSn10/h-BN composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. V. 723. PP. 345–353.

inertness, the boron nitride particles have low adhesion ability [24] and cannot react with the ПХ13М2 metal powder. While pressing, a part of the uniformly distributed h-BN particles in the volume of the charge has a "lubricating effect", contributing to a tighter adhesion of the metal powder particles to each other. At the same time, boron nitride particles under conditions of gradual compaction of the material are partially subject to either direct rapid displacement into the more free zones of reduced density, where the development of deformation processes did not begin due to insufficient applied force or to the gradual slow displacement due to destruction of the relationship of the extreme layers bordering with metal particles (separation of boron nitride particles (Fig.4)). Ultimately, the directed motion of boron nitride particles during pressing leads to the formation of closed grain-boundary porosity in the volume of compacts filled with h-BN particles (regions with an increased concentration of h-BN). In this case, the higher the boron nitride content in the initial charge, the greater the volume fraction of the grain boundary pores.

During sintering the structure is formed according to the model described in [25]. At the interfaces where there are point contacts of metal particles with each other or where the nitride layer thickness is so small that due to thermal expansion of the ПХ13М2 powder they may come into contact with each other, the diffusion mass transfer processes develop, the sintering bridges are formed and metal particles merge with the larger grain formation. In this case, a partial absorption of h-BN particles by growing metal grains is possible (Figs.2 and 5b). At the interfaces with a high content of ceramic particles and in the areas with an increased concentration of boron nitride, the development of the mass transfer processes of and recrystallization is blocked. As a result, weakened boundaries are created in the volume of compacts, which cause high abrasion rates [1, 19].

Thus, the addition of a finely dispersed boron nitride powder into the composition of the initial charge makes it possible to control the strength properties of grain boundaries formed during sintering by

blocking the development of diffusion processes while sintering, and, as a consequence, to achieve the combination of strength and abrasion properties of the composite material ПХ13М2-BN required by operating conditions.

CONCLUSIONS

Addition of finely dispersed h-BN with a graphite-like structure into the composition of powder compacts ПХ13М2 leads to formation of an extended closed grain-boundary porosity filled with boron nitride particles during deformation.

Deformation treatment of the initial charge of powder compacts ПХ13М2-BN leads to the formation of dispersed nanosized 20...200 nm thick boron nitride interlayers along the grain boundaries due to partial stratification of h-BN particles.

In the course of sintering, due to the development of diffusion mass transfer processes, a partial absorption of dispersed h-BN particles by growing metal grains takes place. ■

The research was carried out using the equipment of the Nanotech Center for Collective Use of the USATU.



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Тринадцатая международная специализированная выставка

30 марта - 1 апреля
2021

Москва, ЦВК «Экспоцентр», пав. 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК), т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



выставка
участник
системы



независимый
выставочный
аудит

Параллельно проводится выставка:
ПОЛИУРЕТАНЭКС
12-я международная специализированная выставка
www.polyurethanex.ru



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

YouTube [youtube.com/user/compoexporusia](https://www.youtube.com/user/compoexporusia) @compoexporus @ocompo

Организатор:



ПОЛИУРЕТАНЭКС

Двенадцатая международная специализированная выставка

30 марта - 1 апреля
2021

Москва, ЦВК «Экспоцентр», пав. 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства полиуретанов (добавки, красители, катализаторы, наполнители, и т.д.)
- Оборудование и станки для производства и переработки полиуретанов (расходомерия, шестереночные, оседагональные (шнековые), шлеперные насосные установки, обрабатывающие станки, и т.д.)
- Конечная продукция (контактное уплотнение при литье, фильтры и т.д.)
- Услуги (лабораторные испытания, охрана здоровья и безопасность, переработка, защита окружающей среды, научные разработки)
- Техническое обслуживание оборудования
- Тестовое оборудование

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



выставка
участник
системы



независимый
выставочный
аудит

Параллельно проводится выставка:
КОМПОЗИТ-ЭКСПО
13-я международная специализированная выставка
www.composite-expo.ru



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@polyurethanex.ru | Сайт: www.polyurethanex.ru

YouTube [youtube.com/user/polyexporus](https://www.youtube.com/user/polyexporus) @polyexporus

Организатор:

