

Научная статья  
УДК 539.8  
doi: 10.17223/7783494/4/8

## Исследование влияния добавок $\text{Si}_3\text{N}_4$ и $\text{AlN}$ на получение и свойства горячепрессованных материалов на основе BN

Владимир Данилович Валихов<sup>1</sup>, Илья Александрович Жуков<sup>2</sup>, Николай Сергеевич Евсеев<sup>3</sup>,  
Сергей Николаевич Перевислов<sup>4</sup>, Дмитрий Александрович Ткачѳв<sup>5</sup>,  
Михаил Владимирович Григорьев<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 5, 6</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*  
<sup>4</sup> *НИИ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия*

<sup>1</sup> *valihov.snobls@gmail.com@gmail.com*

<sup>2</sup> *gofra930@gmail.com*

<sup>3</sup> *evseevns@gmail.com*

<sup>4</sup> *perevislov@mail.ru*

<sup>5</sup> *d.tkachev11@gmail.com*

<sup>6</sup> *mvgrigoriev@yandex.ru*

**Аннотация.** Исследование влияния добавок при синтезе материалов на основе графитоподобного нитрида бора является актуальной и важной задачей для науки и промышленности. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния добавок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{AlN}$  на физико-механические свойства и структуру материалов на основе нитрида бора. Результаты показывают, что добавки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{AlN}$  в различных пропорциях позволяют получить структуры с высокой степенью кристалличности и повысить физико-механические свойства.

**Ключевые слова:** графитоподобный, нитрид, бор, кремний, алюминий, керамика, композит

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028.

**Для цитирования:** Валихов В.Д., Жуков И.А., Евсеев Н.С., Перевислов С.Н., Ткачѳв Д.А., Григорьев М.В. Исследование влияния добавок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{AlN}$  на получение и свойства горячепрессованных материалов на основе BN // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 4. С. 72–78. doi: 10.17223/7783494/4/8

Original article  
doi: 10.17223/7783494/4/8

## Study of the influence of $\text{Si}_3\text{N}_4$ and $\text{AlN}$ additives on production and properties of hot-pressed materials based on BN

Vladimir D. Valikhov<sup>1</sup>, Ilya A. Zhukov<sup>2</sup>, Nikolay S. Evseev<sup>3</sup>, Sergey N. Perevislov<sup>4</sup>,  
Dmitriy A. Tkachev<sup>5</sup>, Mikhail V. Grigoriev<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 5, 6</sup> *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*  
<sup>4</sup> *Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus”, Saint Petersburg, Russian Federation*

<sup>1</sup> *valihov.snobls@gmail.com@gmail.com*

<sup>2</sup> *gofra930@gmail.com*

<sup>3</sup> *evseevns@gmail.com*

<sup>4</sup> *perevislov@mail.ru*

<sup>5</sup> *d.tkachev11@gmail.com*

<sup>6</sup> *mvgrigoriev@yandex.ru*

**Abstract.** Graphite-like hexagonal boron nitride (h-BN) is a promising material for the metallurgical industry due to its high melting point and heat resistance, low wettability and ability not to react with other substances. The main disadvantage of this material is its low mechanical properties, which prevent the use of this material for practical purposes. The solution to this problem can be the addition of various additives to boron nitride, increasing its mechanical properties. Currently, to obtain products from boron nitride the method of sintering turbostratic powders of boron nitride, the method of sintering under gas pressure and hot pressing are used. In this paper, the influence of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{AlN}$  additives on the physical and mechanical properties, structure of boron nitride-based materials depending on the sintering temperature and the content of additives was investigated. The investigated materials were obtained by hot pressing at temperatures ranging from 1360 to 1700°C. To intensify the sintering process,

silicon nitrides ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) and aluminum nitrides ( $\text{AlN}$ ) were added to the powder mixture in varying amounts in addition to hexagonal boron nitride. X-ray diffraction studies, porosity, density, modulus of elasticity and compression tests were carried out. The obtained hot-pressed composite materials based on BN have a high degree of crystallinity, containing both crystal structures corresponding to hexagonal boron nitride, silicon and aluminum nitrides, and phases of aluminum oxide, aluminum oxynitride and silicon. Using the example of BN+ 10%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sample, it was found that the highest density of materials obtained at 1500°C is 3,02 g/cm<sup>3</sup> with porosity 0,29. The materials obtained at 1700°C have the highest elastic modulus and sound velocity:  $E = 52,6$  GPa,  $v_{zv} = 4389$  m/s. It was found that the increase in the mass content of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{AlN}$  additives contributes to a significant increase in the density of the material. Increasing the hot pressing temperature from 1360 to 1500°C also contributes to a significant increase in density. Values of elastic modulus and speed of sound do not change significantly with increasing the content of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  +  $\text{AlN}$  additives complex, but increase with increasing the hot pressing temperature and with increasing the mass content of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in the composition from 20% to 50%. Mechanical characteristics with increasing the content of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  +  $\text{AlN}$  additive complex decreases, while with increasing the temperature of hot pressing strength increases. When increasing the mass content of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in the composition from 20% to 30%, the tensile strength increases significantly, at the same time, decreases with the subsequent increase in the mass content of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

**Keywords:** graphite-like, nitride, boron, silicium, aluminium, ceramics, composite

**Acknowledgments:** The research was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State assignment No. FSWM-2020-0028).

**For citation:** Valikhov, V.D., Zhukov, I.A., Evseev, N.S., Perevislov, S.N., Tkachev, D.A. & Grigoriev, M.V. (2023) Study of the influence of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{AlN}$  additives on production and properties of hot-pressed materials based on BN. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 4. pp. 72–78. doi: 10.17223/7783494/4/8 (In Russian).

## Введение

Графитоподобный гексагональный нитрид бора (h-BN) является перспективным материалом для металлургической промышленности благодаря высокой температуре плавления и термостойкости, низкой смачиваемости, а также способности не вступать в реакции с другими веществами. Основным недостатком данного материала являются его низкие механические свойства, из-за чего ограничена область его практического применения. Решением данной проблемы может служить введение в нитрид бора различных добавок, повышающих его механические свойства.

Методом спекания турбостратных порошков нитрида бора с добавлением аморфного бора, спрессованных при комнатной температуре и спечённых в атмосфере азота с температурой от 1300 до 1500°C, позволяет получить материалы с высокой степенью чистоты – до 99,5 масс. % [1]. Полученный материал обладает стабильными механическими и диэлектрическими характеристиками в температурном диапазоне до 2000°C, термической стабильностью и изотропностью свойств. Данным методом можно получать крупногабаритные изделия намного больше, чем изделия, полученные пиролитическим или горячепрессованным методами, однако пористость при спекании турбостратных порошков составляет 20–30 % об. В настоящее время отечественные производители используют схожий метод получения изделий из графитоподобного нитрида бора – при спекании используются борорганические соединения. Данный метод называется газофазным осаждением [2].

Использование  $\text{SiC}$ ,  $\text{ZrB}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  в качестве добавок при синтезе композиционных материалов на основе

нитрида бора было освещено в работе [3]. Применение карбида кремния и диборида циркония позволяет повысить механические свойства, стойкость к окислению, а также уменьшить степень негативного влияния теплового расширения. Положительное влияние добавок  $\text{SiC}$  и  $\text{ZrB}_2$  на перечисленные свойства напрямую сказывается на повышении эффективности данных изделий при эксплуатации в условиях высоких температур. Введение диоксида циркония в качестве добавки при получении изделий из нитрида бора обеспечивает повышение коррозионной стойкости и прочностных свойств за счёт трансформационного упрочнения. Переизбыток  $\text{ZrO}_2$  приводит к снижению термостойкости. Добавки  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiC}$  и  $\text{ZrB}$  позволили получить материалы с прочностью при сжатии до 174 МПа, теплопроводностью до 42 Вт/м·К, термостойкостью свыше 7 циклов при температуре 1600°C.

Существует способ получения нитрида бора методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) путём химического восстановления оксида бора алюминием в среде азота [4]. Установлено, что методом СВС порошков в системе  $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Al}$  можно получить материал  $\text{BN-Al}_2\text{O}_3$ , содержащий 20–28 мас. % гексагонального нитрида бора в зависимости от давления азота. Микроструктурные исследования показали, что полученные порошковые материалы содержат отдельные гексагональные частицы BN размером <3 мкм.

Описание получения пористого композиционного материала на основе BN методом спекания под давлением газа с добавлением  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , при различном содержании BN, приведено в работе [5]. В качестве порообразователя в технологии получения композита использовали 10% бензойную кислоту. По результатам исследований установлено, что увеличение

содержания BN приводит к увеличению кажущейся пористости композита BN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> до 21,2%, следовательно, и к снижению прочностных свойств. Однако диэлектрические характеристики керамического композита на основе нитрида бора повысились: при содержании фазы BN в количестве 10% диэлектрическая проницаемость составляет 5,14, а тангенс угла диэлектрических потерь – 0,0085. В сравнении с пористым Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> без BN значения полученного композиционного материала на 33,5 и 62,2% ниже. Несмотря на тенденцию к повышению кажущейся пористости и снижению механических свойств композита BN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с 10% BN, прочность на изгиб данного материала составила 190,1 МПа при вязкости разрушения в 4,16 МПа·м<sup>1/2</sup>.

### Материалы и методы

Исследуемые материалы получены методом горячего прессования при температуре от 1360 до 1700°C. Для интенсификации процесса спекания в состав порошковой смеси кроме гексагонального нитрида бора

добавлены нитриды кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) и алюминия (AlN) в различном количестве. Структуру исходных и спеченных материалов исследовали методом рентгенофазового анализа со скоростью съёмки 2°/мин с использованием Shimadzu XRD-6000 (Shimadzu Corporation, Токио, Япония) с CuKα-излучения с Ni-фильтром. Идентификация результатов РФА проводилась с применением программного обеспечения Crystallographica Search Match и картотеки JCPDS. Плотность и пористость композиционных материалов на основе гексагонального BN измеряли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 9391–80 [6] и ГОСТ 24409–80 [7].

В табл. 1 представлены состав и температура горячего прессования при синтезе материалов на основе гексагонального нитрида бора.

Модуль упругости определяли методом резонансных колебаний на установке «ЗВУК–130». По известным резонансным частотам подсчитывали упругие постоянные материалов [8]. Точность измерения составила 1–2%. Механические испытания образцов на сжатие проводили на универсальной испытательной машине «Shimadzu AG–300kNX».

Таблица 1

Состав материалов и температура процесса горячего прессования материалов на основе нитрида бора

№ образца	Состав материала	Температура горячего прессования, °С
1	BN + 5 % AlN + 5 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1500
2	BN + 10 % AlN + 10 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1500
3	BN + 10 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1360
4	BN + 10 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1500
5	BN + 10 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1700
6	BN + 20 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1500
7	BN + 30 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1500
8	BN + 50 % Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1500

### Результаты

Фазовый состав полученных горячепрессованных материалов на основе нитрида бора представлен на рис. 1–3.

Исходя из полученных дифрактограмм, можно сделать вывод, что полученные горячепрессованные

композиционные материалы на основе BN обладают высокой степенью кристалличности, содержат как кристаллические структуры, соответствующие гексагональному нитриду бора, нитридам кремния и алюминия, так и фазы оксида алюминия, оксинитрида алюминия и кремния.

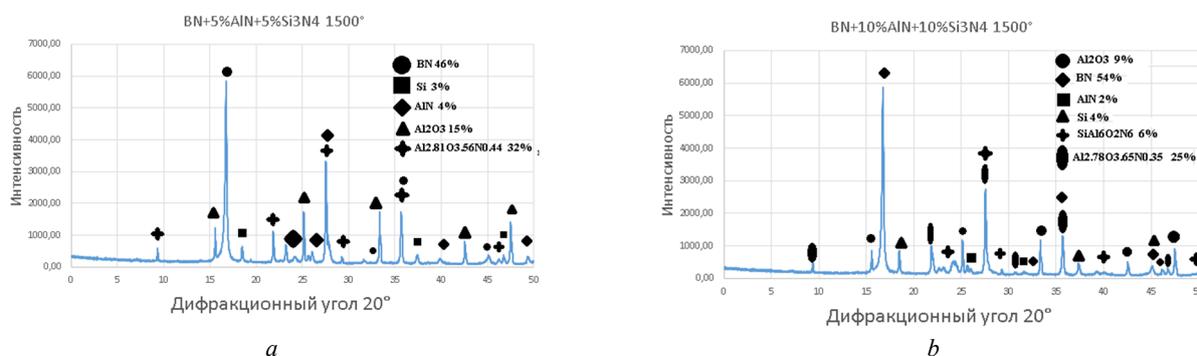


Рис. 1. Дифрактограммы материалов на основе BN, полученных при температуре горячего прессования 1500°C с добавкой 5% AlN + 5% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (a) 10% AlN + 10% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (b)

Fig. 1. XRD patterns of BN-based materials obtained at hot pressing temperature of 1500°C with 5% AlN + 5% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (a) 10% AlN + 10% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (b)

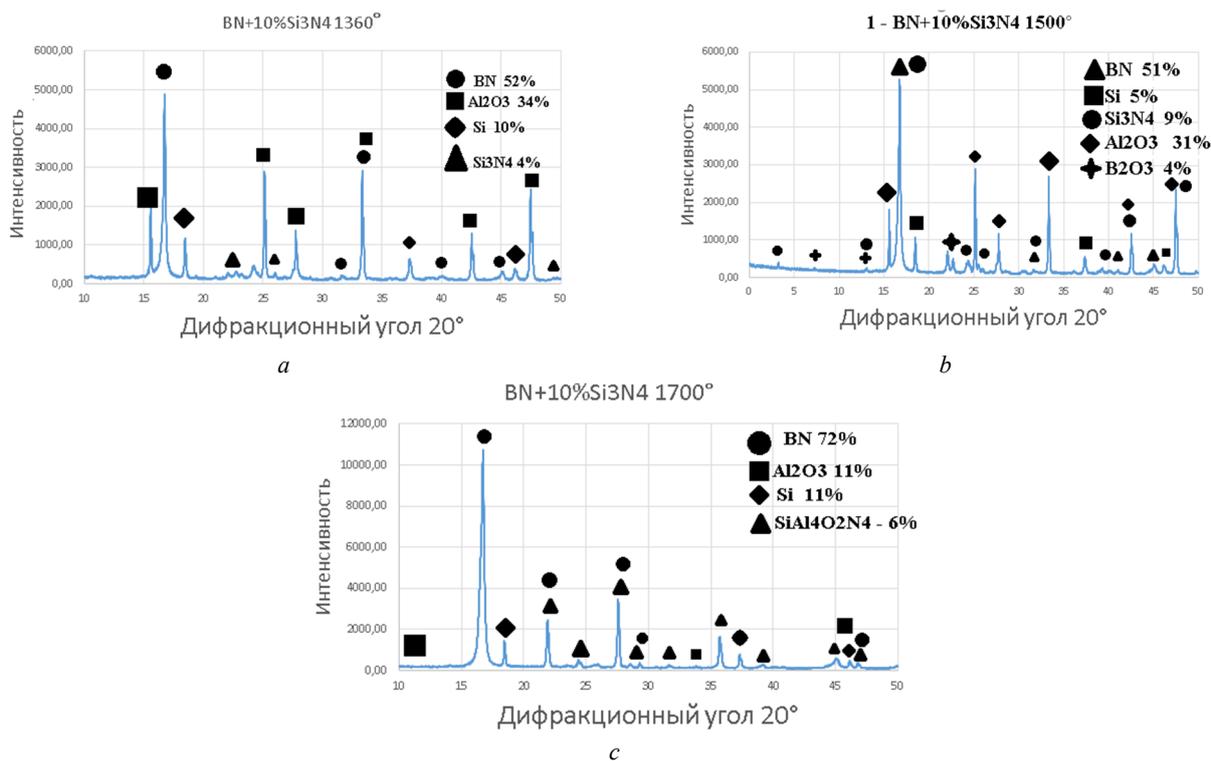


Рис. 2. Дифрактограммы материалов на основе BN с содержанием 10%  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученных при температуре горячего прессования 1360°C (a), 1500°C (b) и 1700°C (c)

Fig. 2. XRD patterns of BN-based materials containing 10%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  obtained at hot pressing temperatures of 1360°C (a), 1500°C (b) and 1700°C (c)

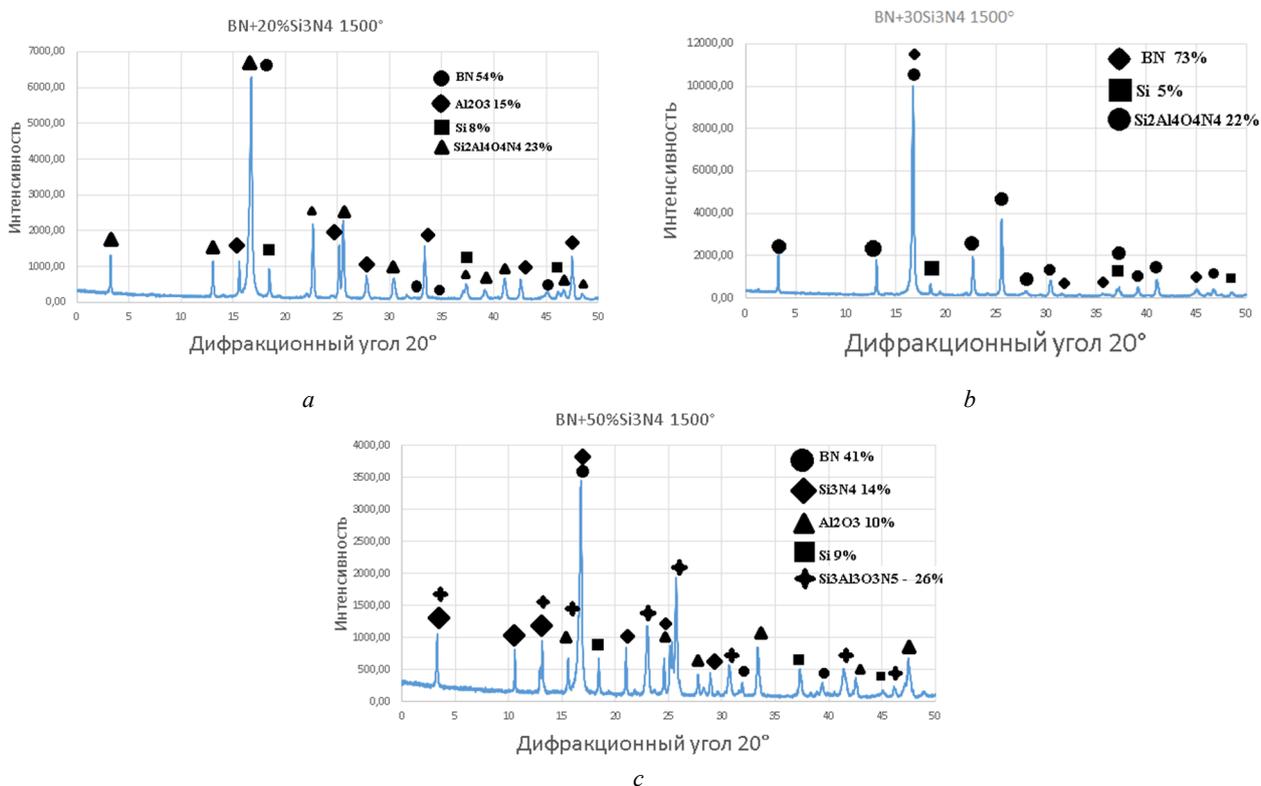


Рис. 3. Дифрактограммы материалов на основе BN, полученных при температуре горячего прессования 1500°C с добавкой 20%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (a), 30%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (b), 50%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (c)

Fig. 3. XRD patterns of BN-based materials obtained at hot pressing temperature of 1500°C with 20%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (a), 30%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (b), 50%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (c) additive

Для исследования влияния температуры горячего прессования на плотность и пористость композиционных материалов на основе гексагонального нитрида бора была выбрана композиция BN + 10% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (рис. 4).

Из графиков (рис. 4) можно сделать вывод, что наибольшей плотностью обладают материалы, полученные при температуре 1500°C – 3,02 г/см<sup>3</sup> при пористости 0,29.

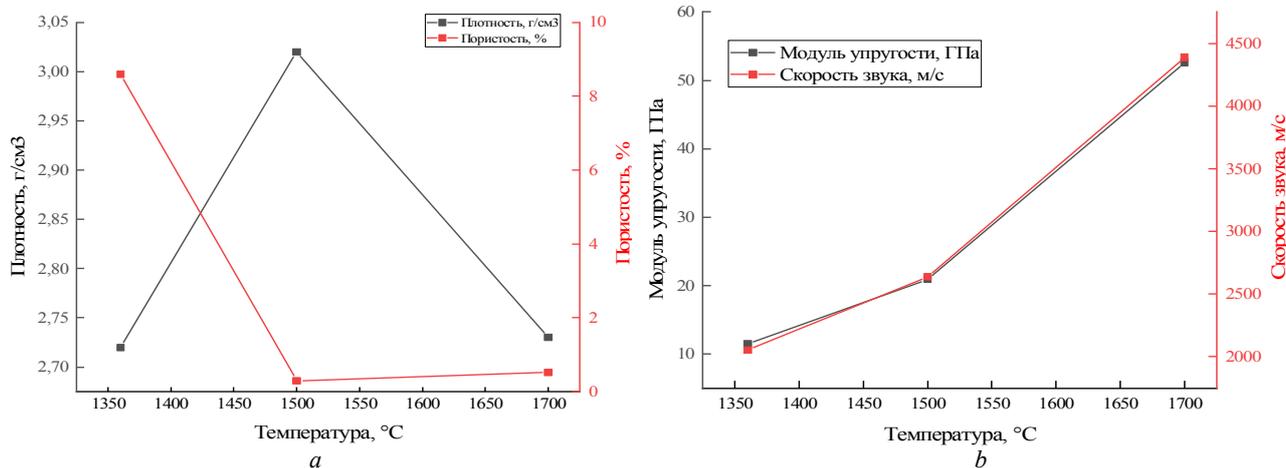


Рис. 4. Зависимость плотности и пористости (а) и модуля упругости и скорости звука (b) от температуры горячепрессованных материалов состава BN + 10% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Fig. 4. Dependence of density and porosity (a) and elastic modulus and speed of sound (b) on temperature of BN + 10% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Таблица 2

Свойства горячепрессованных материалов на основе нитрида бора

№ образца	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Модуль упругости, ГПа	Скорость звука, м/с
1	2,73	10,39	23,0	2783
2	2,97	1,19	20,0	2710
3	2,72	8,59	11,5	2054
4	3,02	0,29	20,9	2638
5	2,73	0,52	52,6	4389
6	2,79	2,88	18,2	2555
7	2,80	0,97	27,3	3122
8	2,66	0,12	38,9	3687

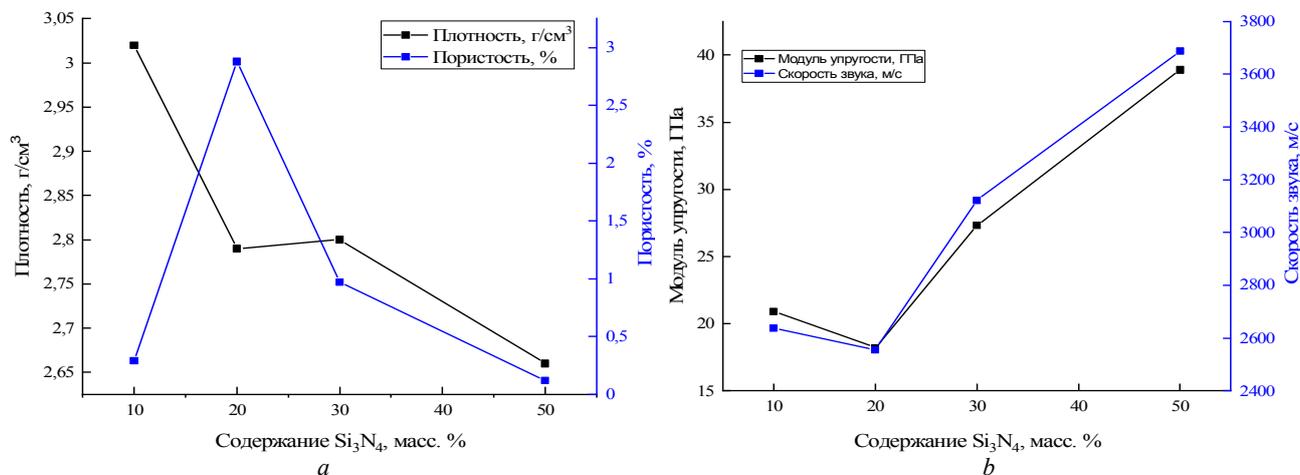


Рис. 5. Зависимость плотности и пористости (а), модуля упругости и скорости звука (b) от содержания Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при температуре прессования 1500°C

Fig. 5. Dependence of density and porosity (a), modulus of elasticity and speed of sound (b) on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> content at pressing temperature 1500°C

Повышение температуры горячего прессования с 1360 до 1500°C также способствует существенному повышению плотности. При этом последующее повышение температуры горячего прессования до 1700°C не оказывает существенного влияния на плотность горячепрессованного материала на основе гексагонального нитрида бора. Значения модуля упругости и скорости звука существенно не

изменяются с повышением содержания комплексной добавки  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{AlN}$ , при этом возрастают с повышением температуры горячего прессования, а также при повышении содержания  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в составе материала с 20 до 50%. Результаты исследования прочности полученных горячепрессованных материалов на основе гексагонального нитрида бора приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Прочность горячепрессованных материалов на основе нитрида бора

№ образца	Размеры образца		Нагрузка $P$ , кг	Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа
	$d$ , мм	$h$ , мм		
1	10,83	2,84	121	128,9
2	10,89	2,58	84	88,5
3	10,64	3,25	144	159,1
4	11,08	3,04	160	156,6
5	10,82	1,55	191	203,9
6	11,18	2,82	108	103,9
7	11,17	2,49	192	192,3
8	11,19	4,80	124	125,9

Исходя из полученных результатов (табл. 3), можно сделать вывод, что предел прочности при сжатии с повышением содержания добавок  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{AlN}$  снижается, при этом с повышением температуры горячего прессования предел прочности возрастает. При повышении массового содержания  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в составе с 20 до 30% предел прочности существенно увеличивается, при этом его значения снижаются при последующем увеличении содержания  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Результаты из табл. 2 и 3 для образцов  $\text{BN} + 5\% \text{AlN} + 5\% \text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{BN} + 10\% \text{AlN} + 10\% \text{Si}_3\text{N}_4$ , полученных при одинаковой температуре, не укладываются в общую тенденцию, так как значения скорости звука равны (2783 и 2710 м/с), однако значения пористости (10,39 и 1,19%) и прочности на сжатие (128,9 и 88,5 МПа) сильно разнятся. Предположительно данные образцы различны по своей структуре ввиду

разности состава, что также сказывается на пористости и прочности на сжатие. Данная особенность строения будет изучена при дальнейшей работе в этом направлении.

## Выводы

Проведённые исследования показывают, что метод горячего прессования нитрида бора в диапазоне температур от 1360 до 1700°C с добавками  $\text{AlN}$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  позволяет получать керамические композиционные материалы на основе  $\text{BN}$  с высокой степенью кристалличности. Наибольшая плотность образцов составляет  $3 \pm 0.03 \text{ г/см}^3$  и соответствует композициям  $\text{BN} + 5\% \text{AlN} + 5\% \text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{BN} + 10\% \text{Si}_3\text{N}_4$ , полученным при температуре 1500°C. Наибольшие модуль упругости и скорость звука достигаются при температуре горячего прессования 1700°C.

## Список источников

1. Курдюмов А.В., Бритун В.Ф. Турбостратный нитрид бора: особенности структуры и фазовых превращений // Наноструктурное материаловедение. 2010. № 1. С. 3–8.
2. Perevislov S.N. Structure, properties, and applications of graphite-like hexagonal boron nitride // Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Vol. 60 (3). P. 291–295.
3. Chen L., Wang Y., Shen H., Yao M., Rao J., Zhou Y. Effect of SiC content on mechanical properties and thermal shock resistance of  $\text{BN-ZrO}_2\text{-SiC}$  composites // Materials Science & Engineering. 2014. Vol. A590. P. 346–351.
4. Feng Y., Gong H., Zhang Y., Wang X., Che S. Effect of BN content on the mechanical and dielectric properties of porous  $\text{BN}_p/\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics // Ceramics International. 2016. Vol. 42 (1). P. 661–665.
5. Tkachev D.A., Ziatdinov M.H., Zhukov I.A., Litvinova V.A., Belchikov I.A., Kravtsov N.G. Synthesis of Boron Nitride by Reduction of Boron Oxide with Aluminum in Nitrogen // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2023. P. 1–7.
6. ГОСТ 9391–80. Сплавы твердые спеченные. Методы определения пористости и микроструктуры. Введ. 01.01.1983. М.: Издательство стандартов, 1985. 28 с.
7. ГОСТ 24409–80. Материалы керамические электротехнические. Методы испытаний. Введ. 01.01.1982. М.: Издательство стандартов, 1989. 30 с.

8. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л. : Машиностроение, 1977. 208 с.

#### References

1. Kurdyumov, A.V. & Britun, V.F. (2010) Turbostratny nitrid bora: osobennosti struktury i fazovyh prevrashcheniy [Turbostratic boron nitride: peculiarities of structure and phase transformations]. *Nanostrukturnoe materialovedenie*. 1. pp. 3–8.
2. Perevislov, S.N. (2019) Structure, properties, and applications of graphite-like hexagonal boron nitride. *Refractories and Industrial Ceramics*. 60(3). pp. 291–295.
3. Chen, L., Wang, Y., Shen, H., Yao, M., Rao, J. & Zhou, Y. (2014) Effect of SiC content on mechanical properties and thermal shock resistance of BN–ZrO<sub>2</sub>–SiC composites. *Materials Science & Engineering*. A590. pp. 346–351.
4. Feng, Y., Gong, H., Zhang, Y., Wang, X. & Che, S. (2016) Effect of BN content on the mechanical and dielectric properties of porous BN<sub>p</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics. *Ceramics International*. 42(1). pp. 661–665.
5. Tkachev, D.A., Ziatdinov, M.H., Zhukov, I.A., Litvinova, V.A., Belchikov, I.A. & Kravtsov, N.G. (2023) Synthesis of Boron Nitride by Reduction of Boron Oxide with Aluminum in Nitrogen. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. pp. 1–7. doi: 10.1134/S0036023623700328
6. GOST 9391–80. *Splavy tverdyye spechennyye. Metody opredeleniya poristosti i mikrostruktury* [Hard sintered alloys. Methods for determining porosity and microstructure]. Moscow : Izdatel'stvo standartov.
7. GOST 24409–80. *Materialy keramicheskiye elektrotekhnicheskkiye. Metody ispytaniy* [Ceramic electrical materials. Test methods]. Moscow : Izdatel'stvo standartov.
8. Glagovskiy, B.A. & Moskovenko, I.B. (1977) *Nizkochastotnyye akusticheskiye metody kontrolya v mashinostroyenii* [Low-frequency acoustic testing methods in mechanical engineering]. Leningrad : Mashinostroyeniye.

#### Информация об авторах:

**Валихов Владимир Данилович** – аспирант физико-технического факультета, младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: valihov.snobls@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1638-1816

**Жуков Илья Александрович** – доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: gofra930@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0173-4308

**Евсеев Николай Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: evseevns@gmail.com. ORCID: 0000-0002-2664-888X

**Перевислов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, начальник лаборатории «Техническая керамика» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: perevislov@mail.ru.

**Ткачев Дмитрий Александрович** – аспирант физико-технического факультета, младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: d.tkachev11@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1969-2927

**Григорьев Михаил Владимирович** – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории высокоэнергетических систем и новых технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mvgrigoriev@yandex.ru. ORCID: 0009-0009-4214-0312

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

#### Information about the authors:

**Valikhov Vladimir D.**, postgraduate student, junior researcher, Laboratory of nanotechnologies of metallurgy, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: valihov.snobls@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1638-1816

**Zhukov Ilya A.**, Dr. Sc. (Engineering), head of the Laboratory of nanotechnologies of metallurgy, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0173-4308

**Evseev Nikolay S.**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, Laboratory of nanotechnologies of metallurgy, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evseevns@gmail.com. ORCID: 0000-0002-2664-888X

**Perevislov Sergey N.**, Dr. Sc. (Engineering), head of the Laboratory “Technical ceramics”, Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: perevislov@mail.ru.

**Tkachev Dmitry A.**, postgraduate student, junior researcher, Laboratory of nanotechnology metallurgy, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: d.tkachev11@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1969-2927

**Grigoriev Mikhail V.**, Cand. Sc. (Engineering), researcher, Laboratory of high energy systems and new technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mvgrigoriev@yandex.ru. ORCID: 0009-0009-4214-0312

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 8.11.2023; одобрена после рецензирования 28.11.2023; принята к публикации 12.12.2023*

*The article was submitted 8.11.2023; approved after reviewing 28.11.2023; accepted for publication 12.12.2023*