Д. т. н. **С. Н. Перевислов** (✉)

ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов имени И. В. Гребенщикова РАН», Санкт-Петербург, Россия

УДК 661:65+662.8.055

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАФИТОПОДОБНОГО ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

Представлен обзор литературы, включающий описание кристаллической структуры и морфологических особенностей графитоподобного гексагонального нитрида бора, а также получение материалов на его основе. Представлены механические и диэлектрические свойства пиролитического, горячепрессованного (гексагональной и турбостратной модификации) и реакционно-спеченного нитрида бора. Показано положительное влияние пропитки пористых образцов на основе нитрида бора борорганическими и кремнийорганическими соединениями с последующим пиролизом на уровень физико-механических характеристик.

Ключевые слова: *гексагональный нитрид бора, пиролитический нитрид бора, турбостратный нитрид бора, горячее прессование, реакционное спекание.*

ВВЕДЕНИЕ

Нитрид бора является одним из ведущих материалов, используемых для получения композиционных изделий огнеупорной промышленности (наряду с SiC, Si_3N_4, AlN, B_4C). Слоистая структура гексагонального нитрида бора, ковалентный тип кристаллической связи и способность не смачиваться большинством металлов и оксидов ограничивают методы получения плотной керамики на его основе [1–5]. Нитрид бора обладает ценным набором свойств, таких как стойкость к термоудару, высокое удельное электросопротивление (10^{12}–10^{14} Ом·см), нетоксичность, обрабатываемость любыми режущими инструментами, инертность к большинству химических соединений [6–16].

Гексагональный нитрид бора применяется в электронной промышленности прежде всего как электроизоляционный и диэлектрический материал при работе в широком температурном интервале в высокочастотном диапазоне [11]. Нитрид бора перспективен как инертный материал для тиглей при плавлении высокочистых веществ в установках молекулярной эпитаксии, для диэлектрических подложек микросхем, керамических деталей плазменных аппаратов, диэлектрических окон мощных СВЧ-энергий, керамических элементов лампы бегущей волны [17]. Нитрид бора также может быть использован как огнеупорный материал для высокотемпературных печей при работе в инертной среде и вакууме до 2200 °С [9, 13–16]. По триботехническим свойствам нитрид бора превосходит все известные марки металлов и керамики в высокотемпературной области, поэтому перспективными направлениями его применения также являются высокотемпературные истираемые подшипники и надроторные уплотнители [18].

✉
С. Н. Перевислов
E-mail: perevislov@mai.ru

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧАСТИЦ НИТРИДА БОРА

Нитрид бора относится к классу особо термостойких высокотемпературных материалов. В настоящее время известно более 30 соединений, температура плавления которых ≥ 2900 °С. Температура разложения нитрида бора — около 3000 °С, поэтому получение конструкционных материалов на его основе для ряда отраслей (космической, атомной, прецизионной металлургии, тонкой химической технологии) является важной технологической задачей.

Подобно углероду BN имеет слоистую графитоподобную гексагональную модификацию кристаллической решетки (рис. 1) и две алмазоподобные: кубическую типа сфалерита и гексагональную типа вюртцита.

Гексагональный графитоподобный BN состоит из системы плоских параллельных слоев, располагающихся точно друг над другом, причем атомы

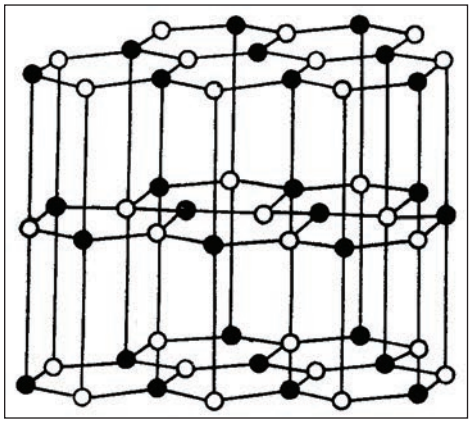

Рис. 1. Кристаллическая структура графитоподобного гексагонального нитрида бора: ● — атомы бора; ○ — атомы азота

бора и азота чередуется в направлении оси *c* (см. рис. 1). Слои построены из правильных гексагонов типа бензольных колец с углом 120 град между связями таким образом, что каждый атом одного вида окружен тремя ближайшими соседями другого сорта. При этом структура B–N характеризуется гетеродесмичностью химических связей вследствие сильного ковалентного взаимодействия в пределах одного монослоя и слабого ван-дер-ваальсового между слоями [19–21]. Это обстоятельство обуславливает отличие данной модификации от алмазоподобной, проявляющееся в таких свойствах графитоподобного BN, как мягкость и способность к смазыванию, а также обрабатываемость керамики на его основе обычным токарным инструментом.

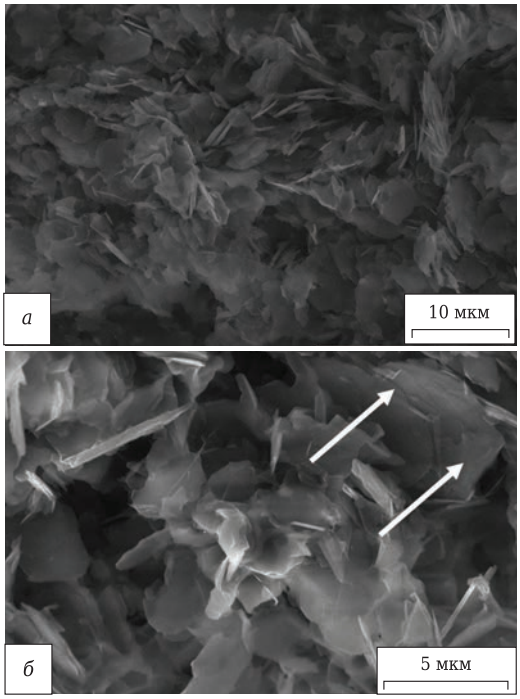

Рис. 2. Частицы порошка графитоподобного гексагонального BN (стрелками показана слоистость структуры частицы)

Кристаллографические особенности графитоподобного BN определяют и другие его достоинства: уникальную термостойкость при воздействии практически любых термоударов, обусловленную высокой теплопроводностью и низким коэффициентом термического расширения, высокое электрическое сопротивление, стабильность диэлектрических характеристик во всем диапазоне частот и прочностных свойств в широком интервале температур, химическую инертность к расплавам металлов, стекол, органическим растворам, концентрированным кислотам.

Однако следует отметить, что те же особенности структуры графитоподобного BN, а именно отсутствие прочностных связей между слоями (в идеальном случае) или между пакетами слоев (в реальном), приводят к невозможности получения из него плотной и прочной керамики без добавок. Кроме того, гетеродесмичность химических связей в структуре графитоподобного нитрида бора является серьезным препятствием для получения изотропной керамики, поскольку анизотропия заложена в структуре этой модификации.

Порошки BN графитоподобной структуры, полученные различными способами, в пределах одной частицы имеют структуру, подобную пиролитическому BN. Частицы порошка выглядят как тонкие чешуйки и пластинки с довольно четкими границами (рис. 2, *а*). На изломе частиц видна слоистость, а также структура базовой плоскости, в которой видны гексагоны, сшитые по граням подобно сотам (рис. 2, *б*). Порошки BN графитоподобной структуры принципиально не способны к спеканию даже в самых экстремальных по температуре и давлению условиях, в пределах которых возможно существование структуры, показанной на рис. 1. Применение же сверхвысоких давлений и температур приводит к фазовому переходу и образованию алмазоподобных модификаций BN.

Таким образом, многочисленные попытки получить высокоплотную керамику из порошков графитоподобного BN способами горячего прессования или спекания заготовок закончились безрезультатно.

При введении в порошок графитоподобного BN спекающих добавок (оксидов, карбидов, боридов, металлов) установлено, что эффект спекания достигается только при введении большого количества (≥ 30 об. %) добавок. Причем полученные материалы, как правило, не обладают набором свойств, присущих высокотемпературным материалам. Кроме того, в ряде случаев исчезали уникальные природные свойства BN, такие как термостойкость, стабильность диэлектрических, электроизоляционных, прочностных характеристик в широком диапазоне температур. Эти свойства достигнуты и продемонстрированы на образцах высокочистого пиролитического BN.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГРАФИТОПОДОБНОГО ГЕКСАГОНАЛЬНОГО BN

Материалы на основе гексагонального BN производят в промышленном масштабе в основном двух видов: пиролитический и горячепрессованный [22–25]. Пиролитические материалы получают методом газофазного осаждения из галогенидов бора и аммиака при высоких температурах. Полученный пиролитическим осаждением BN отличается высокой чистотой и плотностью, но области его применения существенно ограничены из-за трудности изготовления объемных изделий толщиной > 5 мм. При пиролитическом осаждении структура образуется таким образом, что на подложке формируется базовая плоскость, а наращивание толщины идет по оси *c*, при условии соблюдения параллельности слоев. Формирование структуры осуществляется в результате связывания по граням кристаллов в базовой плоскости, чем обеспечивается прочность слоев в этом направлении. Слабая связь между слоями по оси *c* определяет низкую прочность, и уже при незначительной толщине при отсутствии примесей в пиролитическом BN наблюдаются расслоения. Все это является причиной исключительной анизотропии пиролитического BN [22, 26].

Горячепрессованные и пиролитические материалы имеют плотность, близкую к теоретической. Получают их прессованием в графитовых пресс-формах при 1800–2000 °С или в высокотемпературных газостатах. В обоих случаях в материалах в значительном количестве присутствуют оксид бора и вводимые для лучшей спекаемости оксидные компоненты, которые снижают жаропрочность, ухудшают диэлектрические характеристики, термостойкость, а также увеличивают эрозионный унос материала. Все вышеперечисленное ограничивает области применения материалов на основе BN прежде всего в экстремальных условиях эксплуатации (работа в условиях высоких температур [9, 13–15]).

Вследствие особенностей текстуры пиролитические материалы имеют значительную анизотропию свойств, различающуюся на порядок. В горячепрессованных материалах анизотропия свойств менее выражена [23].

Проблема спекания BN до удовлетворительной конструкционной прочности решена с получением турбостратных порошков, модель структуры которых описана в работах [27–30]. В турбостратном BN кроме бора и азота содержится кислород, выделение которого в процессе распада соединения B–N–O на нитрид бора графитоподобной модификации и оксид бора делает систему таких порошков активной к спеканию. Горячим прессованием турбостратных порошков получают материалы, плотность которых близка к теоретической. Однако в образцах такой керамики (так же как и в образцах, изготовленных в условиях газостатического прессования) всегда присутствует оксид бора в количестве, пропорциональном содержанию кислорода в порошке, что приводит к резкому снижению ее высокотемпературной прочности.

Попытки избавиться от этой нежелательной примеси путем термообработки турбостратных порошков с целью снижения содержания кислорода приводят к потере активности их к спеканию, так как формируется структура графитоподобного BN. Удаление же оксида бора из горячепрессованной керамики путем нагрева выше точки кипения B_2O_3 или отмывка горячей водой возможны только в тонкостенных изделиях, но это приводит к существенному ослаблению прочности материала.

Несмотря на использование турбостратного BN горячепрессованные материалы по уровню прочности заметно уступают (в 3–5 раз) горячепрессованным и спеченным материалам на основе ковалентных соединений B_4C [31–34], SiC [35, 36] и Si_3N_4 [37, 38], что еще раз показывает сложность спекания и достижения высокого уровня механических свойств материалов на основе порошков BN.

Существующие материалы на основе пиролитического и горячепрессованного BN, исходя из объемов выпуска, не могут в полной мере обеспечить потребности техники. Возникла необходимость в создании новой технологии получения керамики из BN. За последние несколько лет разработан ряд материалов на основе гексагонального BN, которые имеют преимущества по сравнению с пиролитическими и горячепрессованными не только по достигнутому уровню свойств, но и по технологичности. Эти материалы получены методом полусухого формования в стальных пресс-формах или гидростатического прессования с последующим спеканием. Если представить себе идеальный материал из графитоподобного гексагонального BN, то он должен быть изотропен, иметь теоретическую плотность и не содержать спекающих добавок. Однако такое сочетание свойств принципиально недостижимо из-за особенностей кристаллического строения этого соединения, имеющего слоистость, обусловленную гетеродесмичностью химических связей. Поэтому создание высокочистой изотропной керамики из BN предполагает вынужденный отказ от попыток получения абсолютно плотного материала во избежание анизотропии.

Стремление получить чистые изотропные с достаточной прочностью в широком интервале температур материалы из BN удалось реализовать в реакционно-спеченной керамике, полученной из турбостратных порошков с добавками аморфного бора, при спекании в атмосфере N_2 при

1300–1500 °С [28] или без добавок [39]. Материалы отличаются высокой степенью чистоты (содержание BN ~ 99,5 мас. %, основная примесь — оксид бора), стабильными значениями прочностных и диэлектрических характеристик до 2000 °С, термостойкостью и изотропностью. Технология реакционного спекания позволяет изготавливать изделия из BN более крупных размеров, чем пиролитические и горячепрессованные. Однако пористость их составляет 20–30 об. %, что существенно сказывается на прочностных свойствах.

На рис. 3 показаны зависимости наиболее важных свойств различных материалов из BN от температуры испытания [9, 13–15, 40, 41].

Из сравнения реакционно-спеченной керамики (см. рис. 3, *а*, кривая *4*) с пиролитической (см. рис. 3, *а*, кривая *1*) и горячепрессованной (см. рис. 3, *а*, кривые *2* и *3*) видно, что первая при комнатной температуре имеет предел прочности при изгибе в 2 раза меньше. В области высоких температур такие материалы имеют неоспоримое преимущество прочности перед горячепрессованными материалами на основе BN, сохраняя его практически на одном уровне до 1400 °С. Реакционно-спеченный нитрид бора имеет стабильное значение диэлектрической постоянной до 2000 °С (см. рис. 3, *б*). Уровень его удельного электросопротивления уменьшается в интервале 20–1200 °С (см. рис. 3, *г*, кривая *4*).

Используя реакционно-спеченную керамику из BN как пористую, химически инертную матрицу для пропитки ее кремнийорганическими соединениями с последующим пиролизом, удалось получить изотропный материал с уровнем прочности (при 20–1500 °С), близким к прочности пиролитического BN (см. рис. 3, *а*). Особенностью этого материала является высокая стойкость к окислению. Температура начала окисления на 500 °С выше, чем у реакционно-спеченного BN.

Метод газофазного осаждения основан на спекании отдельных частиц порошка пористой заготовки из BN активными продуктами пиролиза, образующимися в процессе разложения введенных в исходную шихту борорганических или кремнийорганических соединений с последующей термообработкой, что повышает прочность исходного материала в 2–3 раза и позволяет получить изотропный материал на основе BN с уровнем прочности, близким к пиролитическим материалам [42–45]. Толщина образующегося слоя продуктов пиролиза регулируется многими факторами и варьируется от 5 до 20 нм [42, 43]. После повторных пропиток открытая пористость материалов снижается до 1–4 %. Таким методом также можно получать целый ряд керамических продуктов: волокна, порошки, покрытия, полые сферы, пенокерамику, композиты, стекла, стеклокерамику и др. Возможности получения неорганических продуктов пиролиза обусловлены в первую очередь наличием множества элементоорганических соединений, содержащих в своем составе атомы B, Si, N, Al, Zr, Ti и др. в дополнение или вместо атомов углерода. Сочетание этих элементов определяет их переход непосредственно в неорганические соединения SiO_2, TiC, Si_3N_4, B_4C, SiC, BN, AIN и др. [46]. Методом газофазного осаждения можно получать материалы из порошков графитоподобной структуры BN с высоким уровнем прочности (см. рис. 3, *а*, кривая *6*). Максимальная температура обжига таких материалов не превышает 1000 °С.

Данный метод открывает широкие возможности для получения керамики на основе трудноспекаемых тугоплавких материалов при значительно меньших энергозатратах. Он позволяет использовать порошки любой дисперсности, не имеет принципиальных ограничений по габаритам изделий, работы производятся на стандартном печном оборудовании, технология его проста и экономична.

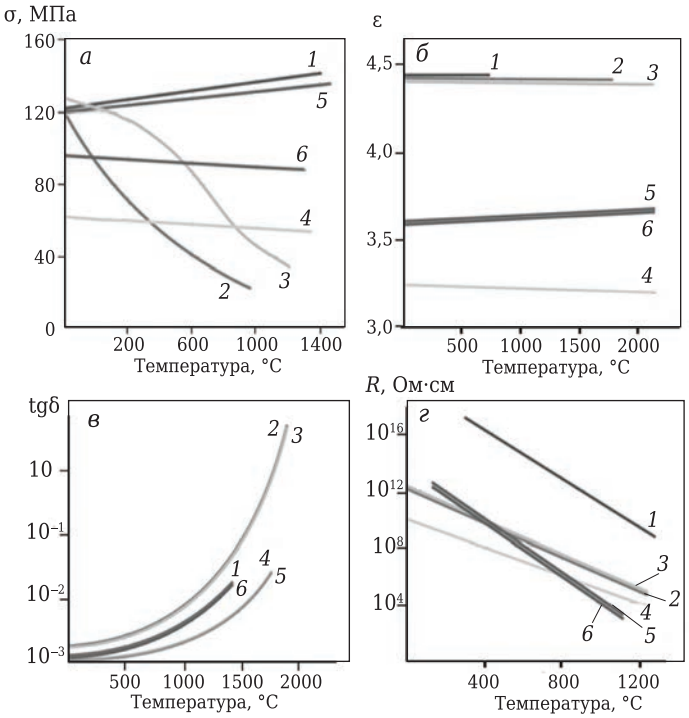

Рис. 3. Зависимость предела прочности при поперечном изгибе σ (*а*), диэлектрической проницаемости ε (*б*), тангенса угла диэлектрических потерь tgδ (*в*) и удельного электросопротивления *R* (*г*) материалов на основе BN от температуры испытания: *1* — пиролитический BN; *2* — горячепрессованный турбостратный BN; *3* — горячепрессованный BN–SiO_2; *4* — реакционно-спеченный BN; *5* — пропитанный кремнийорганическим соединением BN; *6* — спеченный BN методом осаждения из газовой фазы

Керамика из графитоподобного BN может широко применяться в технике высоких температур, и прежде всего как огнеупорный материал в качестве плавильных тиглей и защитных чехлов термопар. Исключительная природная мягкость BN графитоподобной модификации обуславливает использование его в виде легкосрабатываемых уплотнительных колец и подшипников. Стабильность высокого значения электросопротивления вплоть до 2000 °С позволяет использовать BN как электроизоляционный материал. Совокупность уникальных свойств BN, с одной стороны, и все возрастающие потребности современной техники — с другой, обуславливают неослабевающий научно-технологический интерес к BN и материалам на его основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны методы получения и технологические особенности керамических материалов на основе BN (пиролитический, горячепрессованный из порошков BN турбостратной структуры, реакционно-спеченный и газофазный). Показано изменение уровня предела прочности при изгибе в интервале 20–1400 °С и диэлектрических свойств (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное электросопротивление) до 2200 °С. Проведен сравнительный анализ механических и диэлектрических характеристик реакционно-спеченных материалов на основе гексагонального BN с пиролитическим и горячепрессованным.

Библиографический список

1. ***Ci, L.*** Atomic layers of hybridized boron nitride and graphene domains / *L. Ci, L. Song, C. Jin* [et al.] // Nature Materials. — 2010. — Vol. 9, № 5. — P. 430–435.

2. ***Meng, Y.*** BN under compression: the formation of sp^3 bond / *Y. Meng, H. Mao, P. Eng* [et al.] // Nature Materials. — 2004. — Vol. 3, № 2. — P. 111–114.

3. ***Li, X.*** Exfoliation of hexagonal boron nitride by molten hydroxides / *X. Li, X. Hao, M. Zhao* [et al.] // Adv. Mater. — 2013. — Vol. 25, № 15. — P. 2200–2204.

4. ***Song, L.*** Large scale growth and characterization of atomic hexagonal boron nitride layers / *L. Song, L. Ci, H. Lu* [et al.] // Nano Lett. — 2010. — Vol. 10, № 8. — P. 3209–3215.

5. ***Dai, S.*** Tunable phonon polaritons in atomically thin van der waals crystals of boron nitride / *S. Dai, Z. Fei, Q. Ma* [et al.] // Science. — 2014. — Vol. 343, № 6175. — P. 1125–1129.

6. ***Wen, G.*** Coenhanced SiO_2–BN ceramics for high-temperature dielectric applications / *G. Wen, G. L. Wu, T. Q. Lei* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2000. — Vol. 20, № 12. — P. 1923–1928.

7. ***Haubner, R.*** Boron nitrides — properties, synthesis and applications / *R. Haubner, M. Wilhelm, R. Weissenbacher, B. Lux* // High Performance Non-Oxide Ceramics II. — Springer / Berlin. Heidelberg. — 2002. — P. 1–45.

8. ***Klöpfer, C.*** Boron nitride–solutions for aluminum extrusion / *C. Klöpfer* // Aluminium-Düsseldorf Then Isernhagen-Aluminium Verlag GMBH. — 2006. — Vol. 82, № 5. — P. 389–395.

9. ***Eichler, J.*** Boron nitride (BN) and BN composites for high-temperature applications / *J. Eichler, C. Lesniak* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 28, № 5. — P. 1105–1109.

10. ***Eichler, J.*** Boron nitride (BN) and boron nitride composites for applications under extreme conditions / *J. Eichler, K. Uibel, C. Lesniak* // Adv. Sci. Technol. — Trans. Tech. Publications. — 2010. — Vol. 65. — P. 61–69.

11. ***Jia, D.*** Effect of preforming process and starting fused SiO_2 particle size on microstructure and mechanical properties of pressurelessly sintered BN_p/SiO_2 ceramic composites / *D. Jia, L. Zhou, Z. Yang* [et al.]] // J. Am. Ceram. Soc. — 2011. — Vol. 94, № 10. — P. 3552–3560.

12. ***Zhou, Y.*** Mechanical properties and plasma erosion resistance of ZrO_{2p} (3Y)/BN–SiO_2 ceramic composites under different sintering temperature / *Y. Zhou, X. Duan, D. Jia* [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2011. — Vol. 18, № 20. — P. 202, 203.

13. ***Zhang, X.*** High-temperature mechanical and thermal properties of *h*-BN/30 vol. % Y_2SiO_5 composite / *X. Zhang, J. Chen, J. Zhang* [et al.] // Ceram. Int. — 2015. — Vol. 41, № 9. — P. 10891–10896.

14. ***Zhang, X.*** Microstructure and mechanical properties of *h*-BN/Y_2SiO_5 composites / *X. Zhang, J. Chen, J. Zhang* [et al.] // Ceram. Int. — 2015. — Vol. 41, №. 1. — P. 1279–1283.

15. ***Cai, D.*** A novel BN–MAS system composite ceramics with greatly improved mechanical properties prepared by low temperature hot-pressing / *D. Cai, Z. Yang, X. Duan* [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. — 2015. — Vol. 633. — P. 194–199.

16. ***Cai, D.*** Inhibiting crystallization mechanism of *h*-BN on α-cordierite in BN-MAS composites / *D. Cai, Zh. Yang, X. Duan* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2016. — Vol. 36, № 3. — P. 905–909.

17. ***Chen, B.*** Tribological properties of solid lubricants (graphite, *h*-BN) for Cu-based P/M friction composites / *B. Chen, Q. Bi, J. Yang* [et al.] // Tribology International. — 2008. — Vol. 41, № 12. — P. 1145–1152.

18. ***Сагалович, В. В.*** Физико-химические основы получения пиролитического нитрида бора / *В. В. Сагалович, А. Г. Чучкалов, В. И. Кардашов, М. Э. Тарасов*. — Харьков : ХФТИ, 1991. — 284 с.

19. ***Голубев, А. С.*** Нитрид бора. Структура, свойства, получение / *А. С. Голубев, А. В. Курдюмов, А. Н. Пилянкевич*. — Киев : Наукова думка, 1987. — 197 с.

20. ***Курдюмов, А. В.*** Полиморфные модификации углерода и нитрида бора / *А. В. Курдюмов, В. Г. Малоголовец, Н. В. Новиков* [и др.]. — М. : Металлургия, 1994. — 320 с.

21. ***Курдюмов, А. В.*** Закономерности структурообразования при карбидном синтезе нанокристаллического графитоподобного нитрида бора / *А. В. Курдюмов, Т. С. Бартницкая, В. И. Ляшенко* [и др.] // Порошковая металлургия. — 2005. — № 11/12. — С. 88–97.

22. ***Duan, X.*** Effect of sintering pressure on the texture of hot-press sintered hexagonal boron nitride composite ceramics / *X. Duan, D. Jia, Z. Wu* [et al.] // Scripta Mater. — 2013. — Vol. 68, № 2. — P. 104–107.

23. ***Duan, X.*** Anisotropic mechanical properties and fracture mechanisms of textured *h*-BN composite ceramics / *X. Duan, M. Wang, D. Jia* [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. — 2014. — Vol. 607. — P. 38–43.

24. ***Xue, J. X.*** Pressure-induced preferential grain growth, texture development and anisotropic properties of hot pressed hexagonal boron nitride ceramics / *J. X. Xue, J. X. Liu, B. H. Xie, G. J. Zhang* // Scripta Mater. — 2011. — Vol. 65, № 11. — P. 966–969.

25. ***Ertug, B.*** Microstructural aspects of the hot-pressed hexagonal boron nitride ceramics with limited content of boron oxide / *B. Ertug, T. Boyraz, O. Addemir* // Mater. Sci. Forum. — Trans. Tech. Publications. — 2007. — Vol. 554. — P. 197–200.

26. ***Петруша, И. А.*** Фазовые и структурные превращения пиролитических материалов нитрида бора при высоких давлениях : дис. … д-ра техн. наук / *И. А. Петруша* // ИСМ НАН Украины. Киев. — 2002. — 350 с.

27. **Pat. 6306358 USA.** Crystalline turbostratic boron nitride powder and method for producing same / Yamamoto O. — 2001. — 7 p.

28. ***Zhang, X. W.*** Microstructure of the intermediate turbostratic boron nitride layer / *X. W. Zhang, H. G. Boyen, H. Yin* [et al.] // Diamond Relat. Mater. — 2005. — Vol. 14, № 9. — P. 1474–1481.

29. ***Курдюмов, А. В.*** Турбостратный нитрид бора: особенности структуры и фазовых превращений / *А. В. Курдюмов, В. Ф. Бритун* // Наноструктурное материаловедение. — 2010. — № 1. — С. 3–8.

30. ***Олейник, Г. С.*** Особенности структурно-фазовых превращений турбостратного BN при высоких давлениях и температурах / *Г. С. Олейник, И. А. Петруша, А. В. Котко, М. В. Никишина* // Электронная микроскопия и прочность материалов. Серия: Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. — 2015. — № 21. — С. 102–109.

31. ***Nesmelov, D. D.*** Reaction sintered materials based on boron carbide and silicon carbide / *D. D. Nesmelov, S. N. Perevislov* // Glass and Ceramics. — 2015. — Vol. 71, № 9/10. — P. 313–319.

32. ***Perevislov, S. N.*** Effect of Si additions on the microstructure and mechanical properties of hot-pressed B_4C / *S. N. Perevislov, A. S. Lysenkov, S. V. Vikhman* // Inorg. Mater. — 2017. — Vol. 53, № 4. — P. 376–380.

33. ***Perevislov, S. N.*** High density boron carbide ceramics / *S. N. Perevislov, P. V. Shcherbak, M. V. Tomkovich* // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 1. — P. 32–36.

Перевислов, С. Н. Высокоплотная керамика на основе карбида бора / *С. Н. Перевислов, П. В. Щербак, М. В. Томкович* // Новые огнеупоры. — 2018. — № 1. — С. 33–37.

34. ***Perevislov, S. N.*** Phase composition and microstructure of reaction-bonded boron-carbide materials / *S. N. Perevislov, P. V. Shcherbak, M. V. Tomkovich* // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 2. — P. 179–183.

Перевислов, С. Н. Фазовый состав и микроструктура реакционно-связанных материалов на основе карбида бора / *С. Н. Перевислов, П. В. Щербак, М. В. Томкович* // Новые огнеупоры. — 2018. — № 4. — С. 96–100.

35. ***Perevislov, S. N.*** Properties of SiC and Si_3N_4 based composite ceramic with nanosize component / *S. N. Perevislov, D. D. Nesmelov* // Glass and Ceramics. — 2016. — Vol. 73, № 7/8. — P. 249–252.

36. ***Perevislov, S. N.*** Microstructure and mechanical properties of SiC-materials sintered in the liquid phase with the addition of a finely dispersed agent / *S. N. Perevislov, I. B. Panteleev, A. P. Shevchik, M. V. Tomkovich* // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 5. — P. 577–582.

Перевислов, С. Н. Микроструктура и механические свойства LPS SiC-огнеупоров с высокодисперсной спекающей добавкой / *С. Н. Перевислов, И. Б. Пантелеев, А. П. Шевчик, М. В. Томкович* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 10. — С. 42–47.

37. ***Lysenkov, A. S.*** Composite material Si_3N_4/SiC with calcium aluminate additive / *A. S. Lysenkov, K. A. Kim, D. D. Titov* [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing. — 2018. — Vol. 1134, № 1. — P. 012–036.

38. ***Lukianova, O. A.*** Electrical resistivity of silicon nitride produced by various methods / *O. A. Lukianova, A. N. Khmara, S. N. Perevislov* [et al.] // Ceram. Int. — 2018. — № 9.

39. ***Wang, T. B.*** Physical and mechanical properties of hexagonal boron nitride ceramic fabricated by pressure less sintering without additive / *T. B. Wang, C. C. Jin, J. Yang* [et al.] // Advances in Applied Ceramics. — 2015. — Vol. 114, № 5. — P. 273–276.

40. ***Steinborn, C.*** Correlation between microstructure and electrical resistivity of hexagonal boron nitride ceramics / *C. Steinborn, M. Herrmann, U. Keitel* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2013. — Vol. 33, № 6. — P. 1225–1235.

41. ***Тарабанов, Р. В.*** Свойства материалов на основе нитрида бора / *Р. В. Тарабанов, С. Н. Перевислов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2017. — № 1/2. — С. 3–7.

42. ***Михайлов, Б. М.*** Борорганические соединения в органическом синтезе / *Б. М. Михайлов, Ю. Н. Бубнов*. — М. : Наука, 1977. — 515 с.

43. ***Спиридонов, В. С.*** Химическое модифицирование оксида кремния и гидроксилапатита борорганическими соединениями / *В. С. Спиридонов, П. Г. Мингалев, Г. В. Лисичкин* // Вестник Московского университета. — 2002. — Т. 43, № 5. — С. 315, 316.

44. ***Стороженко, П. А.*** Алюминий- и кремнийорганические соединения для современных нанокерамокомпозитов / *П. А. Стороженко, Г. И. Щербакова, А. М. Цирлин* [и др.] // Инж. журнал «Нанотехника». — 2008. — № 2. — С. 25–33.

45. ***Пасечник, М. В.*** Оценка степени сшивания полимеров в композиционных составах для отделки материалов специального назначения / *М. В. Пасечник, И. Н. Кулиш, Г. С. Сарибеков* // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. — Херсон : ХНТУ, 2010. — Т. 16, № 1. — С. 39–43.

46. ***Файнер, Н. И.*** От кремнийорганических соединений предшественников к многофункциональному карбонитриду кремния / *Н. И. Файнер* // Журнал общей химии. — 2012. — Т. 82, № 1. — С. 47–56. ■

Получено 16.01.19
© С. Н. Перевислов, 2019 г