

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

© О.А. Лукьянова¹, В.А. Федоров², В.Ю. Новиков¹,
В.В. Красильников¹, В.В. Сирота¹

¹Белгородский государственный университет

308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85

E-mail: sokos100@mail.ru

²Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина

392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33

E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

На примере исследования керамики на основе нитрида кремния с добавлением оксидов Al_2O_3 - Y_2O_3 , изготовленной холодным изостатическим прессованием и свободным спеканием в атмосфере азота при температуре 1650 °С в течение 1 часа, было показано, что модель, полученная методом конечных элементов, адекватно интерпретирует результаты эксперимента и качественно согласуется с эмпирическими результатами испытаний на двусное сжатие, полученными методом «Шар на трех шарах». На основании представленной модели с учетом упругих характеристик керамики на основе нитрида кремния можно предсказать характер распространения критических трещин в исследуемом материале. Кроме того, было показано, что полученный керамический материал на основе нитрида кремния с добавлением оксидов иттрия и алюминия, полученный спеканием без давления в атмосфере азота, характеризуется умеренно высокими механическими свойствами по сравнению с другими материалами данного класса, в частности, трещиностойкость полученного материала, измеренная методом механических испытаний образцов с v -образным надрезом на трехточечный изгиб, составила $3,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$.

Ключевые слова: нитрид кремния; механические свойства; двусное сжатие; метод конечных элементов

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью керамических материалов традиционно является высокая прочность в совокупности с повышенной хрупкостью. Хрупкость, таким образом, является чрезвычайно важным недостатком всех керамических материалов и нитрида кремния в частности. Метод испытаний типа «Шар на трех шарах» является полупроизводственным аналогом метода трехточечного изгиба ввиду ряда преимуществ, к примеру, по причине простоты пробоподготовки экспериментальных образцов и т. д. [1]. В рамках полуэмпирической модели, полученной методом конечных элементов, имитирующей испытания на двусное сжатие типа «Шар на трех шарах», можно определить характер разрушения образцов исследуемого материала, имеющих форму диска.

В нашей работе для получения керамики на основе нитрида кремния был использован метод свободного спекания без давления. Методом свободного спекания в атмосфере азота при температуре 1650 °С был получен керамический материал на основе нитрида кремния. В сумме по весу количество оксидных добавок составляло 15 %. Соотношение Y_2O_3 к Al_2O_3 было 3:5. Порошки смешивались в дисковой мельнице Retsch RS-220-230В. Время приготовления смесей составляло 20 мин. Скорость перемешивания 250 об./мин. Компактирование осуществлялось при комнатной температуре и давлении 200 МПа. Время выдержки составляло 90 с. Процесс спекания был проведен в атмосфере азота (1 атм.) в высокотемпературной печи Nabertherm VHT

8/22-GR при температуре 1650 °С в течение 1 ч. Более подробно технология получения и некоторые особенности структуры и механических свойств данного типа материалов описаны в наших предыдущих работах [2–11].

Для определения предела прочности на двусное сжатие использовалась методика «Шар на трех шарах» с использованием Zwick Roell Z005 (Advanced Ceramics Institute, Bremen). Испытания были проведены согласно ASTM F 394. Данная методика является сравнительно новой в области двусных испытаний хрупких керамических материалов. Испытания проводились при комнатной температуре. Величина предела прочности σ_{\max} была рассчитана по формуле Шэрти [12]:

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot (1 + \nu)}{4\pi t^2} \cdot \left[1 + 2 \ln \frac{R_a}{b} + \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{2R_a^2} \right) \cdot \frac{R_a^2}{R^2} \right], \quad (1)$$

где F_{\max} – максимальная нагрузка, при которой происходит разрушение образца; ν – коэффициент Пуассона исследуемого материала; t – толщина образца; R_a – расстояние от центра образца до основания опоры; b – радиус стального шарика.

Значение R было вычислено по формуле Годфри [13]:

$$R = 0,721(Fd_b(1 - \nu_b)/E_b + (1 - \nu)/E)^{1/3}, \quad (2)$$

где d_b – диаметр шарика; ν_b – коэффициент Пуассона шарика; E – модуль Юнга исследуемого материала;

Таблица 1

Параметры испытаний типа «Шар на трех шарах»

t , мм	r , мм	b , мм	R , мм	E_b , ГПа	R_{a_2} , мм
2,92	21,97	0,33	8,5	210	35

E_b – модуль Юнга стального шарика. Исследуемые образцы имели форму диска диаметром 44 мм и высотой 3 мм. Исходные параметры испытаний приведены в табл. 1.

В качестве метода измерения трещиностойкости был выбран SENB-метод согласно ISO 15732:2003. Образцы представляли собой параллелепипеды с плоско-параллельными гранями размером 5,6–5,6–50,6 мм.

Трещиностойкость K_{Ic} была рассчитана по формулам:

$$K_{Ic} = \frac{Pd_1}{dw^{3/2}} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{l}{w} \right)^{1/2} Y \left(\frac{l}{w} \right) \right], \quad (3)$$

$$Y \left(\frac{l}{w} \right) = \frac{1,999 - \frac{l}{w} \left(1 - \frac{l}{w} \right) \left[2,15 - 3,93 \frac{l}{w} + 2,7 \left(\frac{l}{w} \right)^2 \right]}{\left(1 + 2 \frac{l}{w} \right) \left(1 - \frac{l}{w} \right)^{3/2}}, \quad (4)$$

где K_{Ic} – трещиностойкость; Y – геометрический фактор; l – длина надреза; w – ширина образца; d – толщина образца; d_1 – расстояние между опорами.

На рис. 1–2 представлены установка и оснастка испытаний типа «Шар на трех шарах» соответственно. На рис. 3 можно видеть, что число полученных в результате разрушения осколков равно трем. Полученная методом конечных элементов модель испытаний представлена на рис. 4а и 4б. Видно, что центр диска является областью воздействия контактной нагрузки верхнего шарика, а также областью максимальной концентрации напряжений и зарождения трещины, ведущей к дальнейшему разрушению по хрупкому механизму (область красного цвета). Обработка экспериментальных данных в рамках модели позволила, таким образом, определить потенциальные траектории разрушения исследуемых образцов согласно распределению напряжений в объеме. Было установлено, что полученная модель адекватно интерпретирует и качественно согласуется с эмпирическими результатами, полученными методом «Шар на трех шарах» (рис. 3).

Об идентичности методов «Шар на трех шарах» – Ball on three balls (B3B) и метода трехточечного изгиба 3PB (three-point bending) свидетельствуют экспериментальные результаты, представленные в табл. 2. А именно, предел прочности на трехточечный изгиб составил 275 МПа, в то время как предел прочности при испытаниях «Шар на трех шарах» составил 277 МПа.

Как и другие механические характеристики, показатель трещиностойкости напрямую зависит от способа получения керамического материала. А именно, трещиностойкость керамики, полученной методами ГИП (горячее изостатическое прессование) и SPS (spark plasma sintering-искровое плазменное спекание), выше трещиностойкости керамики, полученной методом реакционного связывания. На рис. 5 изображен нагруженный образец при испытаниях на трехточечный из-

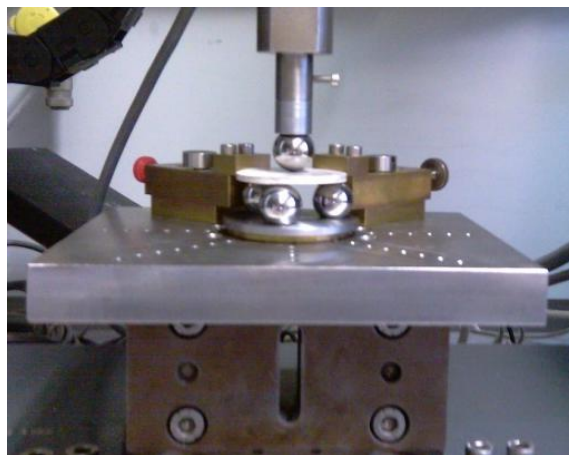


Рис. 1. Испытательная установка на двусное сжатие методом шара на трех шарах

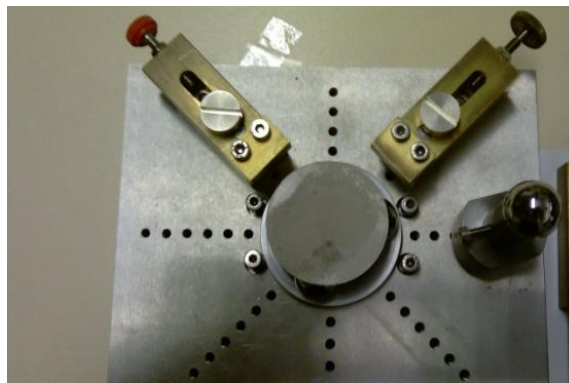


Рис. 2. Оснастка установки на двусное сжатие методом шара на трех шарах

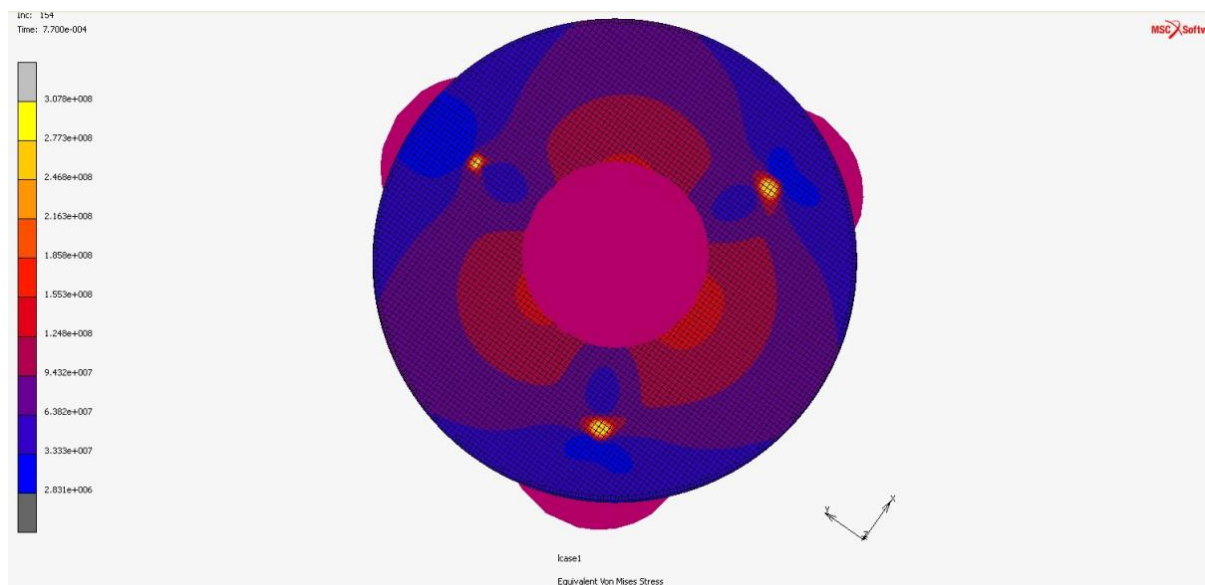


Рис. 3. Разрушенный образец после испытаний на двусное сжатие методом шара на трех шарах

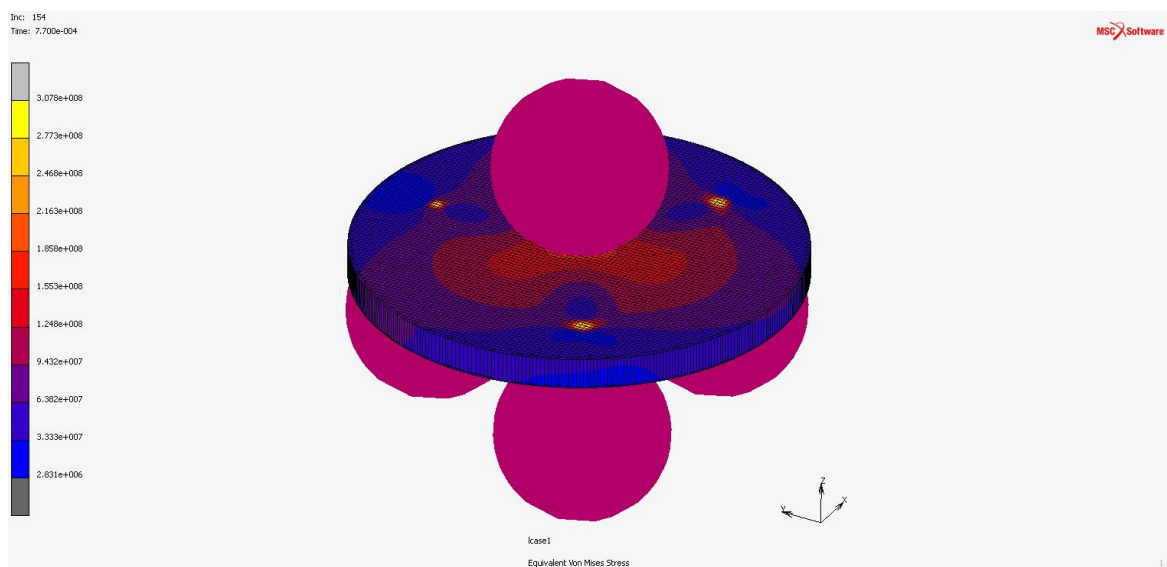
Таблица 2

Результаты испытаний методом «Шар на трех шарах»

ν	F_{max}, H	σ , (B3B), МПа	σ , (3PB), МПа
0,28	1220	277	275



а)



б)

Рис. 4. Испытания на двусное сжатие. Модель, полученная методом конечных элементов: а) вид сверху; б) вид сбоку

гиб с v -образным надрезом. Показатель трещиностойкости, полученный методом SENB (single edge notched beam), составляет $3,2 \text{ МПа}/\text{м}^2$, в то время как трещиностойкость, измеренная методом индентирования (indentation fracture, IF-метод), составила $6,0 \text{ МПа}/\text{м}^2$ (табл. 3) [9].

Столь существенное расхождение в показаниях можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, ряд зарубежных научных трудов [14] приводит неопровержимые недостатки метода IF, а также демонстрирует, что зачастую результаты, полученные данным методом, являются завышенными.

Во-вторых, очевидным фактором является необходимость плоскопараллельности противоположных граней испытываемых образцов, что ввиду высокой твердости и прочности весьма проблематично.

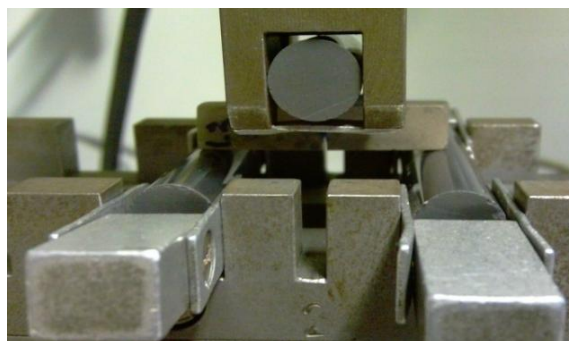


Рис. 5. Нагруженный образец, SENB метод, керамика на основе нитрида кремния с добавлением оксидов иттрия и алюминия, полученная методом свободного спекания

Таблица 3

Трещиностойкость нитрида кремния с добавлением оксидов иттрия и алюминия, полученного свободным спеканием

Метод	SENB	IF
K_{Ic} , МПа/м ²	3,2	6,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было установлено, что керамика на основе нитрида кремния, полученная методом свободного спекания в атмосфере азота при температуре 1650 °С и с добавлением Al_2O_3 - Y_2O_3 , характеризуется сравнительно близким показателем предела прочности на трехточечный изгиб и предела прочности на двусное сжатие и трещиностойкостью 3,2 МПа·м^{-1/2}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Danzer, R., Harrer W., Supancic P., Lube T., Wang Z., Börgner A. The ball on three balls test-strength and failure analysis of different materials // Journal of the European ceramic society. 2007. V. 27. № 2-3. P. 1481-1485.
2. Лукьянова О.А., Сирота В.В., Красильников В.В., Селеменев В.Ф., Докалов В.С., Алтухов А.Ю., Агеев Е.В. Исследование структуры и свойств керамики на основе нитрида кремния с добавлением оксида магния // Физика и технология наноматериалов и структур: сб. науч. ст. 2 Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. Курск, 2015. Т. 1. С. 104-110.
3. Krasil'nikov V.V., Sirota V.V., Ivanov A.S., Luk'yanova O.A., Ivanisenko V.V., Kozlova L.N. Investigation of the structure of Si_3N_4 -based ceramic with Al_2O_3 and Y_2O_3 additives // Glass and Ceramics. 2014. V. 71. № 1-2. P. 15-17.
4. Красильников В.В., Сирота В.В., Иванов А.С., Козлова Л.Н., Лукьянова О.А., Иванисенко В.В. Исследование структуры керамики на основе Si_3N_4 с добавками Al_2O_3 и Y_2O_3 // Стекло и керамика. 2014. № 1. С. 17-19.

5. Сирота В.В., Иванисенко В.В., Красильников В.В., Савотченко С.Е., Лукьянова О.А. Свойства наноструктурной керамики на примере анализа микроструктуры порошков диоксида циркония и механических характеристик нитрида кремния // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2013. № 73-2. С. 113-116.
6. Сирота В.В., Иванисенко В.В., Красильников В.В., Лукьянова О.А., Савотченко С.Е. Экспериментальное и аналитическое исследование механических характеристик композиционной керамики на основе нитрида кремния // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2013. Т. 18. Вып. 4. С. 1865-1866.
7. Сирота В.В., Красильников В.В., Савотченко С.Е., Лукьянова О.А., Иванисенко В.В. Механические свойства композиционной керамики на основе нитрида кремния // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. № 2. С. 264-269.
8. Лукьянова О.А., Сирота В.В., Тушнев К., Хорват Ю., Красильников В.В., Иванов А.С., Козлова Л.Н., Исследование механических свойств конструкционной керамики на основе Si_3N_4 с добавками Al_2O_3 и Y_2O_3 // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 5. С. 17-19.
9. Lukianova O. Mechanical and elastic properties of new silicon nitride ceramics produced by cold isostatic pressing and free sintering // Ceramics International. 2015. V. 41. P. 13716-13720.
10. Лукьянова О.А., Красильников В.В. Изучение упругих характеристик конструкционного керамического материала на основе Si_3N_4 с добавками Al_2O_3 и Y_2O_3 // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 7-8. С. 21-24.
11. Лукьянова О.А., Красильников В.В. Изучение радиотехнических характеристик конструкционной керамики на основе нитрида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 10. С. 29-31.
12. Börgner A., Supancic P., Danzer R. The ball on three balls test for strength testing of brittle discs: stress distribution in the disc // Journal of the European Ceramic Society. 2002. V. 22. P. 1425-1436.
13. Godfrey D.J. Fabrication, formulation, mechanical properties, and oxidation of sintered Si_3N_4 ceramics using disc specimens // Mat. Sci. and Technology. 1985. V. 1. P. 510-515.
14. Quinn J.B., Quinn G.D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach // Journal of Materials Science. 1997. V. 32. № 16. P. 4331-4336.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-38-50119 мол_нр).

Поступила в редакцию 7 сентября 2016 г.

Лукьянова Ольга Александровна, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, аспирант, кафедра теоретической и математической физики, инженер научно-технического Центра конструкционной керамики и инженерного прототипирования, e-mail: sokos100@mail.ru

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Новиков Всеслав Юрьевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, аспирант, кафедра теоретической и математической физики, младший научный сотрудник Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика структуры и свойств наноматериалов», e-mail: vseslav_novikov@mail.ru

Красильников Владимир Владимирович, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, старший научный сотрудник, e-mail: kras@bsu.edu.ru

Сирота Вячеслав Викторович, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, руководитель научно-технического Центра конструкционной керамики и инженерного прототипирования, e-mail: sirota@bsu.edu.ru

UDC 539.2

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2166-2171

MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMICS BASED ON SILICON NITRIDE

© O.A. Lukyanova¹⁾, V.A. Fedorov²⁾, V.Y. Novikov¹⁾,
V.V. Krasilnikov¹⁾, V.V. Sirota¹⁾¹⁾ Belgorod National Research University

85, Pobedy St., Belgorod, Russian Federation, 308015

E-mail: sokos100@mail.ru

²⁾ Tambov State University named after G.R. Derzhavin

33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000

E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Basing on the example of ceramics research based on silicon nitride with the addition of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ oxides was made by cold isostatic pressing and free nodulizing in a nitrogen atmosphere at temperature 1650 °C for an hour was shown that the model procured by finite elements method, adequately interprets the results of the experiment and conforms with empirical results of research on diaxonic pressure, received by the method of “ball on three balls”. Basing on the presented model taking into consideration banding characteristic on the basis of silicon nitride the character of spread of critical crack in the studied material is foreseen. Besides, it was shown that the received ceramic material based on silicon nitride with addition of yttrium oxide and aluminium, received by sintering in a nitrogen atmosphere is characterized by highly mechanical features comparing to other materials of this class particularly resistance to cracking of the received material, measured by the method of mechanical tests of specimen with ν -type notch at three-point bending was $3.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Key words: silicon nitride; mechanical features; diaxonic pressure; finite elements method

REFERENCES

1. Danzer, R., Harrer W., Supancic P., Lube T., Wang Z., Börger A. The ball on three balls test-strength and failure analysis of different materials. *Journal of the European ceramic society*, 2007, vol. 27, no. 2-3, pp. 1481-1485.
2. Luk'yanova O.A., Sirota V.V., Krasil'nikov V.V., Selemenev V.F., Dokalov V.S., Altukhov A.Yu., Ageev E.V. Issledovanie struktury i svoystv keramiki na osnove nitrida kremniya s dobavleniem oksida magniya [The research of structure and features of ceramics based on silicon nitride with adding magnesia oxide]. *Sbornik nauchnykh statey 2 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur»: v 2 t.* [A collection of scientific articles of 2 International scientific-practical conference “Physics and technology of nanomaterials and structure”: in 2 volumes]. Kursk, 2015, vol. 1, pp. 104-110. (In Russian).
3. Krasil'nikov V.V., Sirota V.V., Ivanov A.S., Luk'yanova O.A., Ivanisenko V.V., Kozlova L.N. Investigation of the structure of Si_3N_4 -based ceramic with Al_2O_3 and Y_2O_3 additives. *Glass and Ceramics*, 2014, vol. 71, no. 1-2, pp. 15-17.
4. Krasil'nikov V.V., Sirota V.V., Ivanov A.S., Kozlova L.N., Luk'yanova O.A., Ivanisenko V.V. Issledovanie struktury keramiki na osnove Si_3N_4 s dobavkami Al_2O_3 i Y_2O_3 [The study of structures of ceramics basing on Si_3N_4 with adding Al_2O_3 and Y_2O_3]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2014, no. 1, pp. 17-19. (In Russian).
5. Sirota V.V., Ivanisenko V.V., Krasil'nikov V.V., Savotchenko S.E., Luk'yanova O.A. Svoystva nanostrukturnoy keramiki na primere analiza mikrostruktury poroshkov dioksida tsirkoniya i mekhanicheskikh kharakteristik nitrida kremniya [Features of nano-structures of ceramics basing on the example of microstructures of dioxide powder of zirconium and mechanical characteristics of silicon nitride]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo – Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University*, 2013, no. 73-2, pp. 113-116. (In Russian).
6. Sirota V.V., Ivanisenko V.V., Krasil'nikov V.V., Luk'yanova O.A., Savotchenko S.E. Eksperimental'noe i analiticheskoe issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik kompozitsionnoy keramiki na osnove nitrida kremniya [Experimental and analytical investigation of mechanical properties of composited ceramics constructed on the base of silicium nitride]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 1865-1866. (In Russian).
7. Sirota V.V., Krasil'nikov V.V., Savotchenko S.E., Luk'yanova O.A., Ivanisenko V.V. Mekhanicheskie svoystva kompozitsionnoy keramiki na osnove nitrida kremniya [Mechanical features of compositional ceramics basing on silicon nitride]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki – News of the Tula state university. Natural sciences*, 2014, no. 2, pp. 264-269. (In Russian).
8. Luk'yanova O.A., Sirota V.V., Tushev K., Khorvat Yu., Krasil'nikov V.V., Ivanov A.S., Kozlova L.N., Issledovanie mekhanicheskikh svoystv konstruktivnoy keramiki na osnove Si_3N_4 c dobavkami Al_2O_3 i Y_2O_3 [Investigation of mechanical properties of structural ceramics based on Si_3N_4 with addition Al_2O_3 and Y_2O_3]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian metallurgy (Metally)*, 2015, no. 5, pp. 17-19. (In Russian).
9. Lukianova O. Mechanical and elastic properties of new silicon nitride ceramics produced by cold isostatic pressing and free sintering. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 13716-13720.

10. Luk'yanova O.A., Krasil'nikov V.V. Izuchenie uprugikh kharakteristik konstruksionnogo keramicheskogo materiala na osnove Si_3N_4 s dobavkami Al_2O_3 i Y_2O_3 [The study of elastic constant of construction ceramic material based on Si_3N_4 with addings of Al_2O_3 and Y_2O_3]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Firebrick and technical ceramic], 2015, no. 7-8. pp. 21-24. (In Russian).
11. Luk'yanova O.A., Krasil'nikov V.V. Izuchenie radiotekhnicheskikh kharakteristik konstruksionnoy keramiki na osnove nitrida kremniya [The study of radiotechnical characteristics of construction ceramics based on silicon nitride]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika – Castable refractory and technical ceramics*, 2015, no. 10, pp. 29-31. (In Russian).
12. Börger A., Supancic P., Danzer R. The ball on three balls test for strength testing of brittle discs: stress distribution in the disc. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, vol. 22, pp. 1425-1436.
13. Godfrey D.J. Fabrication, formulation, mechanical properties, and oxidation of sintered Si_3N_4 ceramics using disc specimens. *Mat. Sci. and Technology*, 1985, vol. 1, pp. 510-515.
14. Quinn J.B., Quinn G.D. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach. *Journal of Materials Science*, 1997, vol. 32, no. 16, pp. 4331-4336.

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of RFFR (grant no. 16-38-50119 мол_нр.)

Received 7 September 2016

Lukyanova Olga Aleksandrovna, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Post-graduate Student, Theoretical and Mathematical Physics Department, Engineer of Scientific-Technical Centre of Structural Ceramics and Engineering Prototyping, e-mail: sokos100@mail.ru

Fedorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Novikov Vseslav Yurevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Post-graduate Student, Theoretical and Mathematical Physics Department, Junior Research Worker of Center of Collective Use of Scientific Equipment "Diagnostics of Structure and Properties of Nanomaterials", e-mail: vseslav_novikov@mail.ru

Krasilnikov Vladimir Vladimirovich, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of Material Science and Nanotechnologies Department, Senior Research Worker, e-mail: kras@bsu.edu.ru

Sirota Vyacheslav Viktorovich, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Head of Scientific-Technical Centre of Structural Ceramics and Engineering Prototyping, e-mail: sirota@bsu.edu.ru

Информация для цитирования:

Лукьянова О.А., Федоров В.А., Новиков В.Ю., Красильников В.В., Сирота В.В. Механические свойства керамики на основе нитрида кремния // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2166-2171. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2166-2171

Lukyanova O.A., Fedorov V.A., Novikov V.Y., Krasilnikov V.V., Sirota V.V. Mekhanicheskie svoystva keramiki na osnove nitrida kremniya [Mechanical properties of ceramics based on silicon nitride]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i*

tehnicheskie nauki – Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 2166-2171. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2166-2171 (In Russian).