

УПРУГИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

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

¹) Белгородский государственный университет

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

E-mail: sokos100@mail.ru

²) Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина

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

E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Были исследованы закономерности влияния добавок оксидов магния, иттрия и алюминия на примере композиций типа $Al_2O_3-Y_2O_3$ и Al_2O_3-MgO на упругие свойства керамического материала на основе нитрида кремния, полученного свободным спеканием в атмосфере азота и искровым плазменным спеканием. В частности, на примере исследования керамики на основе нитрида кремния, изготовленной свободным спеканием при температуре 1650 °С с добавлением оксидов 9 мас.% Al_2O_3 и 6 мас.% Y_2O_3 , и изготовленной свободным спеканием при температуре 1800 °С с добавлением оксидов 6 мас.% Al_2O_3 и 2 мас.% MgO было показано, что полученные материалы характеризуются близким значением модуля Юнга в узком диапазоне 248–250 ГПа. В то же время было установлено, что материалы на основе нитрида кремния, полученные искровым плазменным спеканием при температурах 1550 и 1650 °С с добавлением аналогичного состава оксидов $Al_2O_3-Y_2O_3$ и Al_2O_3-MgO , характеризуются более высокими показателями модуля Юнга в интервале 280–300 ГПа. Приведены экспериментальные кривые типа нагрузка-разгрузка индентора для исследуемых материалов на основе нитрида кремния с добавлением оксидных систем типа $Al_2O_3-Y_2O_3$ и Al_2O_3-MgO , полученных искровым плазменным спеканием.

Ключевые слова: нитрид кремния; упругие свойства; модуль Юнга; искровое плазменное спекание; свободное спекание

ВВЕДЕНИЕ

Керамика на основе нитрида кремния в последнее время находит широкое применение во многих областях современной промышленности, где требуется устойчивость к воздействию высоких температур [1]. Данное явление объясняется удачным сочетанием свойств и характеристик рассматриваемой группы керамических материалов на основе нитрида кремния, а именно, как физических свойств (термостабильность, низкий коэффициент термического расширения), так и механических свойств (в т. ч. модуль Юнга).

Ключевым аспектом, оказывающим влияние на механические (в т. ч. упругие) свойства керамического материала, является метод его изготовления. Очевидно, что упругие свойства керамики на основе нитрида кремния обусловлены способом ее получения. Так, к примеру, модуль Юнга, керамики на основе нитрида кремния, полученной методами ГИП (горячее изостатическое прессование) и SPS (плазменное искровое спекание), в среднем на 30 % превышает аналогичный показатель керамических материалов, полученных методом реакционного связывания [2]. Ввиду постоянно растущего интереса науки и оборонного комплекса к применению данного типа керамики, а также высокой дороговизны таких методов, как ГИП и SPS, очевидна необходимость разработки новых бюджетных перспективных методов производства керамики на основе нитрида кремния, а также исследование комплекса физи-

ческих и упругих характеристик полученной керамики. Методы свободного спекания и искрового плазменного спекания являются экономически и технически целесообразной альтернативой известным коммерческим дорогостоящим методам, в частности, методу ГИП [3].

Наиболее значимыми упругими свойствами конструкционной керамики являются модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Модуль Юнга чистого нитрида кремния составляет 298 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. Известно, что модуль Юнга керамики на основе нитрида кремния, полученной методом реакционного связывания, составляет 160 ГПа, в то время как модуль Юнга нитрида кремния, полученного методами ГИП и SPS, более 240 ГПа [2].

В данной работе керамика на основе нитрида кремния была получена методом свободного спекания в атмосфере азота при температуре 1650 °С с добавлением оксидов 9 мас.% Al_2O_3 и 6 мас.% Y_2O_3 . Методом свободного спекания в атмосфере азота при температуре 1800 °С был получен керамический материал на основе нитрида кремния с добавлением оксидов 6 мас.% Al_2O_3 и 2 мас.% MgO . 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. Более под-

робно технология получения и некоторые особенности структуры и механических свойств данного типа материалов описаны в наших предыдущих работах [4–13].

Используемый порошок оксида магния был синтезирован по новой инновационной технологии из гексогидрата нитрата магния ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), который в свою очередь был получен методом выщелачивания в азотной кислоте из серпентинита Халиловского месторождения Оренбургской области. Подробные характеристики данного порошка, а также технология его получения детально описаны в наших предыдущих работах [1; 14].

На сегодняшний день широкую популярность ввиду простоты применения на практике получил метод измерения модуля индентирования, основанный на анализе кривой нагрузки-разгрузки индентора. Модуль индентирования был измерен с помощью автоматизированного прибора Shimadzu DУН-211/DУН-211S.

Керамика на основе нитрида кремния характеризуется высоким показателем модуля упругости [2]. Упругие характеристики нитрида кремния прямо пропорциональны показателю пористости и, очевидно, зависят от плотности.

Значение модуля Юнга для керамики на основе нитрида кремния с добавлением Al_2O_3 - Y_2O_3 , полученной свободным спеканием в атмосфере азота, составило 250 ГПа (табл. 1). В свою очередь, модуль Юнга материала на основе нитрида кремния с добавлением Al_2O_3 - MgO , полученной свободным спеканием в атмосфере азота, составил 248 ГПа (табл. 1).

Как упоминалось ранее, упругие свойства (модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона), равно как и механические свойства зависят от метода получения керамики. К примеру, модуль упругости нитрида кремния, полученного реакционным связыванием, варьируется от 160 до 200 ГПа ($\nu = 0,23$), в то время как модуль Юнга нитрида кремния, полученного методом ГИП, почти вдвое выше ($E = 320$ ГПа, $\nu = 0,28$) [2]. М. Шимада и др. [15] описали высокотемпературную зависимость модуля упругости нитрида кремния, полученного методом ГИП. При комнатной температуре его значение составляло 650 ГПа. С повышением температуры в диапазоне от 650 до 800 °С наблюдалось линейное снижение модуля Юнга керамики.

На рис. 1 приведены кривые нагрузки-разгрузки индентора, полученные при измерении модуля Юнга полученных искровым плазменным спеканием керамических материалов на основе нитрида кремния с различными композициями оксидных спекающих добавок, в частности таких систем, как $MgO-Al_2O_3$ и $Y_2O_3-Al_2O_3$.

Численные показатели модуля Юнга исследуемых образцов, полученных искровым плазменным спеканием, представлены в табл. 2. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что материалы, имеющие в составе шихты оксид магния, характеризуются более низкими показателями модуля Юнга. Так, в частности, для нитрида кремния, спеченного при температурах 1550 и 1650 °С с добавлением $MgO-Al_2O_3$, модуль Юнга составляет 285 и 280 ГПа соответственно. Максимальный модуль индентирования продемонстрировал материал с добавлением $Y_2O_3-Al_2O_3$, спеченный при температуре 1650 °С (300 ГПа). Модуль Юнга материала, изготовленного искровым плазменным спеканием при 1550 °С с добавлением $Y_2O_3-Al_2O_3$, составил 288 ГПа. В целом, все исследуемые материалы на основе нитрида кремния с различными спекающими добавками, полученные искровым плазменным спеканием, продемонстрировали более высокий уровень модуля упругости, нежели материалы, полученные спеканием без давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкционные керамические материалы на основе нитрида кремния с добавками оксидов иттрия, алюминия и магния, полученные методами свободного спекания и искрового плазменного спекания, демонстрируют высокие упругие характеристики. В частности,

Таблица 1

Упругие свойства полученных свободным спеканием керамических материалов на основе нитрида кремния

Модуль Юнга E_{II}	$MgO-Al_2O_3$	$Al_2O_3-Y_2O_3$
	248	250

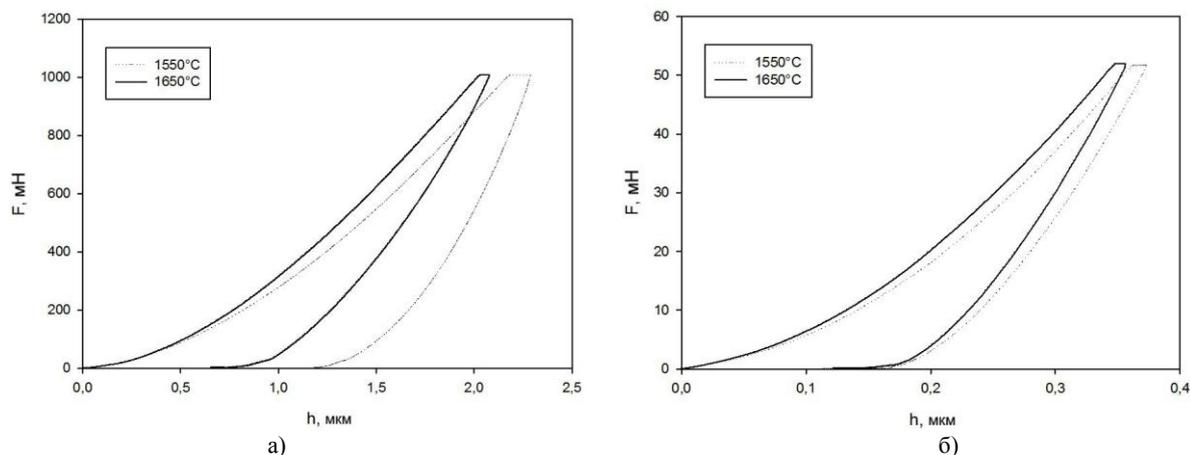


Рис. 1. Кривые нагрузки-разгрузки индентора для нитрида кремния, полученного искровым плазменным спеканием с добавлением а) Al_2O_3 - Y_2O_3 ; б) $MgO-Al_2O_3$

Таблица 2

Упругие свойства полученных искровым плазменным спеканием керамических материалов на основе нитрида кремния

Свойства	MgO-Al ₂ O ₃		Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	
	T, °C	E _и	T, °C	E _и
T, °C	1550	1650	1550	1650
E _и	285	280	288	300

модуль Юнга керамики на основе нитрида кремния с добавлением оксидов 6 мас.% Al₂O₃ и 2 мас.% MgO составил 248 ГПа, с добавлением 9 мас.% Al₂O₃ и 6 мас.% Y₂O₃ – 250 ГПа. Более высокий уровень модуля Юнга в диапазоне 280–300 ГПа был характерен для материалов на основе нитрида кремния, полученных искровым плазменным спеканием при температурах 1550 и 1650°C с добавлением аналогичного состава оксидов.

В данной работе показано, что конструкционная керамика на основе нитрида кремния, полученная методами свободного спекания и искрового плазменного спекания с добавками порошков оксида иттрия, алюминия и магния, ввиду высоких для данного класса материалов упругими свойствами представляется весьма перспективной в широком диапазоне потенциальных областей применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреевский П.А. Нитрид кремния – синтез и свойства // Успехи химии. 1995. Т. 64. № 4. С. 311-329.
2. Munz D., Fett T. Ceramics: mechanical properties, failure behavior, materials selection // Springer. 1999. P. 298.
3. Hiraio K., Ohashi M., Brito M., Kanzaki S. Processing Strategy for Producing Highly Anisotropic Silicon Nitride // Journal of the American Ceramic Society. 1995. V. 78. № 6. P. 1687-1690.
4. 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.
5. 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 Si₃N₄-based ceramic with Al₂O₃ and Y₂O₃ additives // Glass and Ceramics. 2014. V. 71. № 1-2. P. 15-17.
6. Красильников В.В., Сирота В.В., Иванов А.С., Козлова Л.Н., Лукьянова О.А., Иванисенко В.В. Исследование структуры керамики на

основе Si₃N₄ с добавками Al₂O₃ and Y₂O₃ // Стекло и керамика. 2014. № 1. С. 17-19.

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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 Si₃N₄ с добавками Al₂O₃ и Y₂O₃ // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 5. С. 17-19.
11. 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.
12. Лукьянова О.А., Красильников В.В. Изучение упругих характеристик конструкционного керамического материала на основе Si₃N₄ с добавками Al₂O₃ и Y₂O₃ // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 7-8. С. 21-24.
13. Лукьянова О.А., Красильников В.В. Изучение радиотехнических характеристик конструкционной керамики на основе нитрида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 10. С. 29-31.
14. Sirota V.V., Lukianova O.A., Krasilnikov V.V., Selemenev V.F., Dokalov V.S. Microstructural and physical properties of magnesium oxide-doped silicon nitride ceramics // Results in Physics. 2016. V. 6. P. 82-83.
15. Shimada M., Matsushita M., Kuratan H., Kamoto T., Tsukuma M., Ukidate T. Temperature-Dependence of Young Modulus and Internal-Friction in Alumina, Silicon-Nitride, and Partially Stabilized Zirconia Ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 1984. V. 67. № 2. P. 23-24.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «У.М.Н.И.К.» – «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» в рамках проекта № 0018796 «Разработка технологии получения конструкционной керамики на основе нитрида кремния и оксида магния методом холодного изостатического прессования и свободного спекания» (договор № 9263ГУ2/2015 от 24.12.2015 г.).

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: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2172-2176

ELASTIC 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

The influence and regularities of the magnesium, yttria and alumina oxide additives on the example of compositions such as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ on the elastic properties of the ceramic material based on silicon nitride obtained by free sintering in nitrogen and by spark plasma sintering were investigated. In particular based on the example of silicon nitride ceramics produced by free sintering at 1650 °C with the addition of 9 wt. % of Al_2O_3 , and 6 wt. % of Y_2O_3 , and obtained by free sintering at 1800 °C with the addition of 6 wt. Al_2O_3 oxides and 2 wt. % MgO has been shown that the produced ceramics exhibit a close value of Young's modulus in a narrow range 248–250 GPa. At the same time it was found that materials based on silicon nitride obtained spark plasma sintering at temperatures of 1550 °C and 1650 °C with the same composition of addition of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ oxides have higher rates of Young's modulus in the range 280–300 GPa. The experimental curves of load-unload of the indenter of the materials based on silicon nitride with the addition of oxides systems such as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ obtained by spark plasma sintering have also been shown.

Key words: silicon nitride; elastic properties; Young's modulus; spark plasma sintering; free sintering

REFERENCES

1. Andrievskiy R.A. Nitrid kremniya-sintez i svoystva [Silicon nitride – synthesis and properties]. *Uspekhi khimii – Russian Chemical Reviews*, 1995, vol. 64, no. 4, pp. 311-329. (In Russian).
2. Munz D., Fett T. Ceramics: mechanical properties, failure behavior, materials selection. *Springer*, 1999, pp. 298.
3. Hirao K., Ohashi M., Brito M., Kanzaki S. Processing Strategy for Producing Highly Anisotropic Silicon Nitride. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, vol. 78, no. 6, pp. 1687-1690.
4. 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 properties of ceramics basing on silicon nitride with sodium oxide additives]. *Sbornik nauchnykh statey 2 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur»: v 2 t.* [A collection of scientific articles of 2nd International scientific-practical conference "Physics and technology of nano-materials and structures"]. Kursk, 2015, vol. 1, pp. 104-110. (In Russian).
5. 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.
6. 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 and Y_2O_3 [The research of structures of ceramics basing on Si_3N_4 with additives of Al_2O_3 and Y_2O_3]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2014, no. 1, pp. 17-19. (In Russian).
7. 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 [Properties of nano-structures of ceramics basing on the example of analysis of dioxide of zirconium dust microstructures 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).
8. 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 Estestvennyye i tekhnicheskije nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 1865-1866. (In Russian).
9. 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 properties of compositional ceramics basing on silicon nitride]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki – News of the Tula state university. Natural sciences*, 2014, no. 2, pp. 264-269. (In Russian).
10. 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 ce-

- ramics 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).
11. 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.
 12. Luk'yanova O.A., Krasil'nikov V.V. Izuchenie uprugikh kharakteristik konstruktivnogo keramicheskogo materiala na osnove Si_3N_4 s dobavkami Al_2O_3 i Y_2O_3 [The research of elastic constant of engineering structural material based on Si_3N_4 with additives Al_2O_3 and Y_2O_3]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika – Castable refractory and technical ceramics*, 2015, no. 7-8, pp. 21-24.
 13. Luk'yanova O.A., Krasil'nikov V.V. Izuchenie radiotekhnicheskikh kharakteristik konstruktivnoy keramiki na osnove nitrida kremniya [Study of radiotechnical characteristics of structural ceramics based on silicon nitride]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika – Castable refractory and technical ceramics*, 2015, no. 10, pp. 29-31.
 14. Sirota V.V., Lukianova O.A., Krasilnikov V.V., Selemenev V.F., Dokalov V.S. Microstructural and physical properties of magnesium oxide-doped silicon nitride ceramics. *Results in Physics*, 2016, vol. 6, pp. 82-83.
 15. Shimada M., Matsushita M., Kuratan H., Kamoto T., Tsukuma M., Ukidate T. Temperature-Dependence of Young Modulus and Internal-Friction in Alumina, Silicon-Nitride, and Partially Stabilized Zirconia Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 1984, vol. 67, no. 2, pp. 23-24.

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of Fund of innovations assistance within the framework of program “U.M.N.I.K.” – “Participant of youth scientific-innovational competition” within the framework of project no. 0018796 “Development of technology of structural ceramics realization based on silicon nitride and magnesium oxide by the method of cold isostatic pressing and free nodulizing”.

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. Упругие свойства керамики на основе нитрида кремния // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2172-2176. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2172-2176

Lukyanova O.A., Fedorov V.A., Novikov V.Y., Krasilnikov V.V., Sirota V.V. Uprugie svoystva keramiki na osnove nitrida kremniya [Elastic properties of ceramics based on silicon nitride]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennyye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 2172-2176. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2172-2176 (In Russian).