УДК 537.226.3 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-159-163

Влияние добавки нанопорошка оксида кремния на эффективность уплотнения при термическом спекании циркониевой керамики

С.А. Гынгазов[a], С.А. Шевелев[b]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, Томск, Россия
[a]ghyngazov@tpu.ru , [b]wevelev@tpu.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-2524-9238, [b]https://orcid.org/0000-0002-3968-2227
Статья поступила 16.07.2018, принята 9.08.2018

Объектом исследования является керамика на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Изучены вопросы влияния керамических добавок иного состава на механические характеристики керамики. В отличие от проведенных ранее исследований, в которых изучалось влияние добавки оксида висмута, в данной работе исследовано влияние добавки диоксида кремния, полученного методом электронно-лучевого испарения, на плотность порошковых компактов и механические свойства керамики на основе диоксида циркония. Средний размер частиц диоксида кремния был 23 нм, максимальный размер не превышал 50 нм. В качестве исходного использовался ультрадисперсный порошок частично стабилизированного диоксида циркония $97ZrO_2$-$3Y_2O_3$ (моль%), полученный методом разложения водных растворов азотнокислых солей циркония и иттрия в плазме высокочастотного разряда. Введение добавки диоксида циркония в исходный порошок производилось путем простого механического перемешивания с многократным промежуточным просеиванием через сито, количество варьировалось в диапазоне 5–30 масс.%. Кинетические процессы усадки исследовались методом дилатометрии. Установлено, что увеличение количества добавки приводит к снижению плотности порошковых компактов. Показано, что рост количества добавки SiO_2 приводит к увеличению скорости уплотнения компактов при спекании и снижению температуры, соответствующей максимальной скорости уплотнения. При увеличении количества добавки SiO_2 механические свойства спеченной керамики ухудшаются. Имеет место уменьшение как плотности керамики, так и ее микротвердости. Полученный композит ZrO_2-SiO_2 обладает сравнительно высокими механическими характеристиками. Показано, что введение добавки нанопорошка диоксида кремния приводит к увеличению линейных размеров образцов при термическом спекании на стадии изотермической выдержки, что вызвано расширением газов, заключенных в объеме закрытых пор.

Ключевые слова: циркониевая керамика; электронно-лучевое испарение; нанопорошок; дилатометрия; спекание керамики.

Effect of silicon oxide nanopowder additive on compaction efficiency at thermal sintering of zirconium ceramics

S.A. Ghyngazov[a], S.A. Shevelev[b]

National Research Tomsk Polytechnic University; 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia
[a]ghyngazov@tpu.ru , [b]wevelev@tpu.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-2524-9238, [b]https://orcid.org/0000-0002-3968-2227
Received 16.07.2018, accepted 9.08.2018

The object of the study is ceramics based on zirconium dioxide stabilized with yttrium oxide. The problems of the influence of ceramic additives of a different composition on the mechanical characteristics of ceramics have been studied. In contrast to previous studies, in which the effect of the addition of bismuth oxide has been studied, the effect of the addition of silicon dioxide obtained by electron-beam evaporation on the density of powder compacts and the mechanical properties of ceramics based on zirconium dioxide has been studied in this paper. The average particle size of the silica was 23 nm. The maximum size did not exceed 50 nm. The ultrafine powder of partially stabilized zirconium dioxide $97ZrO_2$-$3Y_2O_3$ (mol%), obtained by decomposition of aqueous solutions of nitric acid salts of zirconium and yttrium in a high-frequency discharge plasma, was used as a starting material. The addition of zirconia to the original powder was carried out by simple mechanical agitation with multiple intermediate sieving through a sieve, the amount being varied in the range of 5-30% by weight. Kinetic shrinkage processes were investigated by dilatometry. It was found that an increase in the amount of the additive leads to a decrease in the density of powder compacts. It is shown that an increase in the amount of SiO2 additive leads to an increase in the compacting rate of compacts during sintering and a decrease in temperature corresponding to the maximum compaction rate. As the amount of the SiO_2 additive increases, the mechanical properties of the specific ceramics deteriorate. There is a decrease in both the density of the ceramic and its microhardness. The resulting ZrO2-SiO2 composite exhibits relatively high mechanical characteristics. It is shown that the addition of a silicon dioxide nanopowder additive results in an increase in the linear dimensions of the samples during thermal sintering at the isothermal aging stage, which is caused by the expansion of gases enclosed in the volume of closed pores.

Keywords: zirconium ceramics; electron-beam evaporation; nanopowder; dilatometry; sintering of ceramics.

Введение

На сегодняшний день сферы применения пористой керамики на основе диоксида циркония весьма разнообразны [1]. Она используется в качестве фильтров [2–4], мембран [5–7], носителей катализаторов [3; 8–10], в биомедицине [3; 11–14], при создании газовых датчиков [15; 16] и многих других областях науки и техники. Ее уникальные физико-химические свойства, такие как высокая коррозионная стойкость, устойчивость к высоким температурам, радиационным воздействиям, биологическая совместимость обеспечивают керамике приоритетное положение в этих областях по сравнению с металлами и полимерами. Важной задачей при создании пористой оксидной керамики является обеспечение требуемого сочетания заданного значения пористости и высоких механическими характеристик готового продукта. Известен ряд методов получения пористой циркониевой керамики: метод гелевого литья [17], литье при резком изменении температуры [18], добавление порообразующего агента [19]. В основе этого метода лежит добавление к исходному керамическому сырью горючей добавки, удаляемой на этапе спекания. При этом в готовых изделиях присутствуют продукты сгорания порообразующего агента. Это часто недопустимо, особенно в материалах медицинского назначения [20]. В то же время, в качестве добавки можно использовать вещества, способствующие созданию пористой структуры, но сохраняющиеся в готовой керамике. Одним из таких веществ является диоксид кремния (SiO_2).

SiO_2 в виде наноразмерного порошка активно используется в различных областях промышленности и науки. Это обусловлено рядом необычных свойств, в частности, низкой диэлектрической постоянной, малой теплопроводностью, высокой удельной площадью поверхности и высокой термической стабильностью. Нанопорошок SiO_2 применяется в качестве добавок при производстве лакокрасочных изделий, антикоррозийных, антифрикционных и гидрофобных покрытий, резиновых изделий [21; 22], а также в строительной области в качестве добавок для бетонов, сухих строительных смесей, термостойких и теплоизоляционных материалов [23; 24]. В последнее время нанопорошок SiO_2 находит применение при создании молекулярных мембран, работающих в химически агрессивных средах при высоких температурах [25–27].

Пористую циркониевую керамику можно получить, снижая температуру спекания. Однако этот путь приводит к сильному ухудшению механических свойств и поэтому не является оптимальным. Гораздо больший эффект можно получить, используя добавки, повышающие пористость керамики при сохранении высоких механических характеристик. В качестве такой добавки перспективно использовать нанопорошок диоксида кремния. В этой связи представляет интерес проследить, как добавка нанопорошка диоксида циркония влияет на механические характеристики циркониевой керамики.

Цель данной работы — изучение влияния добавки нанопорошка SiO_2, полученного путем электронно-лучевого испарения, на пористость и механические свойства спеченной циркониевой керамики.

Методика эксперимента. В качестве исходного использовался ультрадисперсный порошок состава $97ZrO_2$-$3Y_2O_3$ (моль%), полученный методом разложения водных растворов азотнокислых солей циркония и иттрия в плазме высокочастотного разряда [28]. Характеристики исходного порошка (тип А) представлены в табл. 1 [29]. Известно, что данные порошки характеризуются плохой компактируемостью [30]. С целью улучшения плотности компактов порошки обрабатывались в планетарной мельнице «Активатор-2SL» с барабанами и мелющими шарами из диоксида циркония. Соотношение массы шаров к массе порошка равнялось 1,5. Время помола составило 30 мин при частоте вращения 1 500 об/мин.

Таблица 1

Характеристики исходного порошка диоксида циркония

Удельная поверхность, $м^2 \cdot г^{-1}$	Средний диаметр, *нм*	Фазовый состав, *% масс*
14,1	70,9	ZrO_2 (62 t+38 m)

Нанопорошок SiO_2 получен путем электронно-лучевого испарения кварцевого песка (99,6 % SiO_2, Ташлинское месторождение, Россия) в атмосфере воздуха [32]. Согласно данным работы [32], в порошке присутствуют как мелкие частицы, образующие агломераты, так и относительно небольшое количество крупных частиц. Основная масса частиц имела размер 10–20 нм, максимальный размер не превышал 50 нм, средний размер частиц равен 23 нм.

Изменение объема пористого пространства циркониевой керамики обеспечивалось варьированием величины добавки нанопорошка SiO_2 к исходному керамическому порошку стабилизированного диоксида циркония. Добавка SiO_2 в порошок диоксида циркония осуществлялась в количестве 5, 10 и 30 масс.% (порошки типов Б, В и Г соответственно). Введение добавки осуществлялось механическим перемешиванием. Для более равномерного распределения добавки полученный порошок многократно просеивался через сито с размером ячейки 200 мкм.

Из подготовленных порошков изготавливались компакты без добавок (тип А) и с добавкой SiO_2 (типы Б–Г). Порошковые компакты в форме цилиндров диаметром 9 мм и толщиной около 3 мм изготавливали одноосным статическим прессованием при давлении 140 МПа на лабораторном гидравлическом прессе ПГР-10.

Исследование кинетики уплотнения в процессе спекания компактов производилось на высокочувствительном дилатометре DIL402C фирмы NETZSCH (Германия) в воздушной среде. Температура спекания составляла 1 400 °С, время изотермической выдержки — 1 ч. Скорость нагрева и охлаждения составляла 10 ºС/мин и была одинакова во всех режимах. Для учета вклада линейного расширения толкателя и держателя образцов результаты измерений корректировали с учетом предварительно проведенной калибровки с использованием стандартного корундового образца.

Определение плотности спеченной керамики производилось методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде на весах (Shimadzu AUW-220 D), оснащенных для этих целей специальной приставкой. Определение микротвердости керамических образцов проводили на микротвердомере ZHV1M фирмы Zwick (Германия). Нагрузка на индентор составляла 500 г, время выдержки под нагрузкой — 10 с. На поверхность образцов наносилось не менее 10 отпечатков индентора.

Экспериментальные результаты. В табл. 2 представлены плотности порошковых компактов для спекания образцов типов А–Г. В табл. 2: $\rho_{пр}$ — плотность прессовки; $\rho_{гидр}$, Θ, H_v — соответственно плотность, пористость и микротвердость спеченной керамики. На табл. 2 видно, что при увеличении доли SiO_2 плотность компактов снижается. Известно [32], что порошки, полученные электронно-лучевым испарением, характеризуются малым размером частиц и избытком свободной энергии. Это приводит к объединению частиц в прочные конгломераты. Следовательно, снижение плотности компактов при увеличении содержания SiO_2 объясняется увеличением доли относительно крупных и прочных конгломератов в объеме прессовки.

Таблица 2

Характеристик исходных компактов и спеченных образцов керамики исследуемых типов

Тип образца	$\rho_{пр}$, *г/см*^{3}	$\rho_{гидр}$, *г/см*^{3}	Θ, %	H_v, *ГПа*	$T_м$, °C
Тип А	3,130	5,556	1,32	10,2	1 260,2
Тип Б	2,928	4,757	7,30	10,2	1 223,8
Тип В	2,744	4,543	6,95	8,1	1 203,2
Тип Г	2,120	3,235	5,58	6,8	1 197,3

Типичная кинетическая зависимость линейной усадки $\Delta L/L_0$ для образцов исследуемых типов представлена на рис. 1. Путем нахождения первой производной для кривой определена $T_м$ — температура, соответствующая максимальной скорости спекания. Значения $T_м$ для образцов типов А–Г представлены в табл. 1.

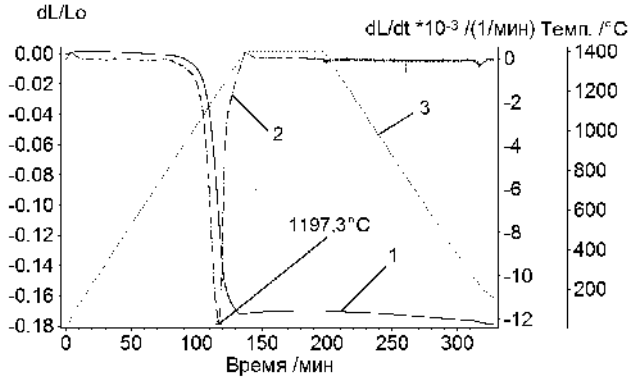

Рис. 1. Типичная кинетическая зависимость линейной усадки: 1 — дилатометрическая кривая; 2 — первая производная кривой 1; 3 — температурная программа

На рис. 2 представлены кинетические зависимости линейной усадки компактов исследуемых типов. На рис. 2 видно, что на стадии линейного нагрева образцы с добавлением SiO_2 демонстрируют увеличение скорости уплотнения по сравнению с образцами без добавок, тем большее, чем больше величина добавки. На стадии изотермической выдержки для образцов типа А усадка продолжается при значительном снижении скорости, а размеры образцов типов Б, В и Г увеличиваются. Подобное поведение можно объяснить следующим механизмом [30; 33]. Наличие в исходном порошке SiO_2 крупных и прочных конгломератов приводит к образованию в объеме прессовки большого количества закрытых пор. При спекании компакта одновременно идут два процесса: межчастичное взаимодействие, приводящее к уплотнению образца за счет перемещения и сращивания отдельных частиц, а также возрастание объема газовых пор. На стадии линейного нагрева межчастичный механизм уплотнения превалирует над увеличением объема газовых пор, что приводит к более интенсивному уплотнению образцов (рис. 2). Это подтверждается снижением температуры $T_м$ (табл. 2). На стадии изотермической выдержки роль расширения газовых пор возрастает. При этом для компактов без добавки SiO_2 (образцы типа А) расширения не наблюдается, так как объем пор в них меньше, чем в образцах с добавкой (типы Б, В и Г), ввиду отсутствия крупных конгломератов, вносимых SiO_2.

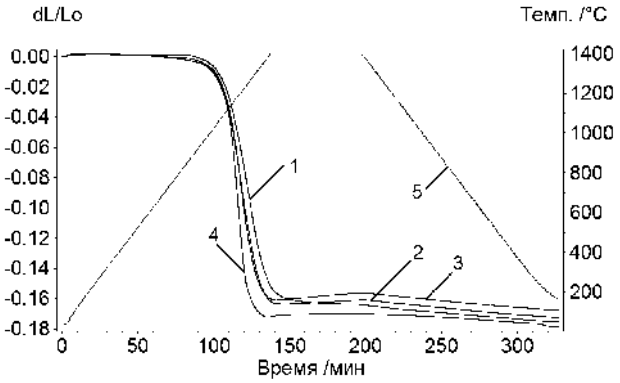

Рис. 2. Кинетические зависимости линейной усадки $\Delta L/L_0$ компактов исследуемых типов: 1 — тип А; 2 — тип Б; 3 — тип В; 4 — тип Г; 5 — температурная программа

Выводы

Проведено исследование влияния добавки нанопорошока SiO_2, полученного путем электронно-лучевого испарения, на механические свойства циркониевой керамики. При этом установлено следующее.

Возрастание доли добавки нанопорошока SiO_2 от 5 до 30 % вызывает изменение характеристик компактов и спеченной керамики, а именно:

1) плотность порошковых компактов уменьшается от 2,928 до 2,120 г/см^3, что вызвано ростом объема обладающих высокой плотностью конгломератов наночастиц SiO_2 в объеме прессовки и увеличением пористости керамики;

2) плотность спеченной керамики снижается от 4,757 до 3,235 г/см^3; микротвердость снижается от 10,2 до 6,8 ГПа.

Полученный композит ZrO_2-SiO_2(70–30%) обладает достаточно высокими механическими характеристиками для технологического использования.

Введение добавки SiO_2 вызывает увеличение линейных размеров образцов на стадии изотермической выдержки, что обусловлено расширением газов, заключенных в объеме закрытых пор.

Литература

1. Okada K., Isobe T., Katsumata K., Kameshima Y., Nakajima A., MacKenzie K.J.D. Porous ceramics mimicking nature – preparation and properties of microstructures with unidirectionally oriented pores // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. Vol. 12., № 6. doi: 10.1088/1468-6996/12/6/064701.

2. Colombo P. Conventional and novel processing methods for cellular ceramics // Phil. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci. 2006. Vol. 364, № 1838. P. 109-124.

3. Yuan L., Ma B., Zhu Q., Zhang X., Zhang H., Yua J. Preparation and properties of mullite-bonded porous fibrous mullite ceramics by an epoxy resin gel-casting process // Ceram. Int. 2017. Vol. 43, №7. P. 5478-5483.

4. Wenzel C., Aneziris G.C., Tsetsekou A. A Study on application of silicon carbide filters for water purification // Proceedings of 10th ECerS conference. Baden-Baden: Göller Verlag; 2007. P. 2073-2078.

5. Cuo Z., Liu H., Zhao F., Li W., Peng S., Chen Y. Highly porous fibrous mullite ceramic membrane with interconnected pores for high performance dust removal // Ceram. Int. 2018. Vol. 44, № 10. P. 11778-11782.

6. Shqau K., Mottern M.L., Yu D., Verweijw H. Preparation and properties of porous – Al_2O_3 membrane supports // J. Am. Ceram. Soc. 2006. Vol. 89, № 6. P. 1790-1794.

7. Hu X.J., Chen W.D., Huang Y. Fabrication of Pd/ceramic membranes for hydrogen separation based on low-cost macroporous ceramics with pencil coating // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35, №15. P. 7803-7808.

8. Obradović N., Filipović S., Đorđević N., Kosanović D., Marković S., Pavlović V., Maca K. Effects of mechanical activation and two-step sintering on the structure and electrical properties of cordierite-based ceramics // Ceram. Int. 2016. Vol. 42, № 12. P. 13909-13918.

9. Duan W., Yin X., Luo C., Kong J., Ye F., Pan H. Microwave-absorption properties of SiOC ceramics derived from novel hyperbranched ferrocene-containing polysiloxane // J. Eur. Ceram. Soc. 2017. Vol. 37, № 5. P. 2021-2030.

10. Vernoux P., Guth M., Li X. Ionically conducting ceramics as alternative catalyst supports // Electrochem. Solid-State Lett. 2009. Vol 12, № 7. P. 9-11.

11. Kelly B.A. Why engineer porous materials? // Phil. Trans. R. Soc. A. 2005. Vol. 364. №1838. P. 5-14.

12. Rambo C.R., Cao J., Seiber H. Preparation of highly porous biomorphic YSZ ceramics // Mater. Chem. Phys. 2004. Vol. 87, № 2-3. P. 345-352.

13. Jones A.C., Arns C.H., Hutmacher D.W., Milthorpe B.K., Sheppard A.P., Knackstedt M.A. The correlation of pore morphology, interconnectivity and physical properties of 3D ceramic scaffolds with bone ingrowth // Biomaterials. 2009. Vol. 30, №7. P. 1440-1451.

14. Laasri S., Taha M., Laghzizil A., Hlil E.K., Chevalier J. The effect of densification and dehydroxylation on the mechanical properties of stoichiometric hydroxyapatite bioceramics // Mater. Res. Bull. 2010. Vol. 45, №10. P. 1433-1437.

15. Coi Y.J., Seeley Z., Bandyopadhyay A., Bose S., Akbar S.A. Aluminum doped TiO_2 nano-powders for gas sensors // Sens. Actuators B. 2007. Vol. 2, № 1. P. 111-117.

16. Akbar S., Dutta P., Lee Ch.High-temperature ceramic gas sensors: a review // Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2006. Vol. 3, № 4. P. 302-311.

17. Xue W., Huang Y., Xie Z., Liu W. Al_2O_3 ceramics with well-oriented and hexagonally ordered pores: the formation of microstructures and the control of properties // J. Eur. Ceram. Soc. 2012. Vol. 32, № 12. P. 3151-3159.

18. Tang Y., Miao Q., Qiu S., Zhao K., Hu L. Novel freeze-casting fabrication of aligned lamellar porous alumina with a centrosymmetric structure // J. Eur. Ceram. Soc. 2014. Vol. 34, № 15. P. 4077-4082.

19. Ge H., Wang G., Yuan B., Dong B., Li H. Fabrication and microstructure of porous SiC ceramics using suspension emulsions as pore forming agents // Ceram. Int. 2014. Vol. 40, № 8 (A). P. 11705-11711.

20. Левков Р.В., Жуков И.А. Буякова С.П., Кульков С.Н. Пористая керамика, полученная из оксида и гидроксида алюминия // Ползуновский вестник. 2015. № 1. С. 23-25.

21. Zhai L., Cebeci F.C., Cohen R.E., Rubner M.F. Stable superhydrophobic coatings from polyelectrolyte multilayers // Nano Letters. 2004. Vol. 4, № 7. P. 1349-1353.

22. Sviridenok A.I., Krautsevich A.V., Lysenko V.I., Mikulich S.I., Ihnatouski M.I., Bardakhanov S.P. Friction properties of thin coatings based on epilams nanomodified by silica // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, № 3. P. 225-235.

23. Lin K.L., Chang W.C., Lin D.F., Luo H.L., Tsai M.C. Effects of nano-SiO_2 and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar // Journal of Environmental Management. 2008. Vol. 88, № 4. 70 p.

24. Quercia G., Brouwers H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures // The 8th fib international PhD symposium in civil engineering. 2010. P. 431-436.

25. Liu X.W., Li J.W., Zhou L., Huang D.S., Zhou Y.P. Adsorption of CO_2, CH_4 and N_2 on ordered mesoporous silica molecular sieve // Chem. Phys. Lett. 2005. Vol. 415, № 4–6. P. 198–201.

26. Jain A., Rogojevic S., Ponoth S., Agarwal N., Matthew I., Gill W.N., Persans P., Tomozawa M., Plawsky J.L., Simonyi E., Porous silica materials as low-k dielectrics for electronic and optical interconnects // Thin Solid Films. 2001. Vol. 398–399. P. 513–522.

27. Nair B.N., Yamaguchi T., Okubo T., Suematsu H., Keizer K., Nako S.I. Sol-gel synthesis of molecular sieving silica membranes // J. Membr. Sci. 1997. Vol. 135, № 2. P. 237–243.

28. Kuzjukevics A., Linderoth S. Grabis J. Characterization of yttria-doped zirconia powders produced by plasma-chemical method // Solid State Ionics. 1996. Vol. 92, № 3–4. P. 253-260.

29. Ghyngazov S.A., Frangulyan T.S. Impact of pressure in static and dynamic pressing of zirconia ultradisperse powders on compact density and compaction efficiency during sintering // Ceram. Int. 2017. Vol. 43, № 18. P. 16555-16559.

30. Surzhikov A.P., Frangylyan T.S., Ghyngazov S.A. A dilatometric study of the effect of pressing on the kinetics of compression of ultrafine zirconium dioxide powders under thermal annealing // Russian Physics Journal. 2012. Vol. 55, № 4. P. 345-352.

31. Бардаханов С.П. Применение мощных ускорителей типа ЭЛВ для получения нанопорошков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 2008. № 5. С. 165-168.

32. Бардаханов С.П. Синтез гидрофобизированных нанопорошков диоксида кремния // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. физика. 2013. Т. 8, № 1. С. 92-98.

33. Гынгазов С.А., Шевелев С.А. Влияние давления прессования компактов из ультрадисперсного порошка диоксида циркония, допированного оксидом висмута, на эффективность уплотнения при термическом спекании и механические свойства спеченной керамики // Изв. высших учеб. заведений. Физика. 2017. Т. 60, № 10. С. 181-184.

References

1. Okada K., Isobe T., Katsumata K., Kameshima Y., Nakajima A., MacKenzie K.J.D. Porous ceramics mimicking nature – preparation and properties of microstructures with unidirectionally oriented pores // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. Vol. 12., № 6. doi: 10.1088/1468-6996/12/6/064701.

2. Colombo P. Conventional and novel processing methods for cellular ceramics // Phil. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci. 2006. Vol. 364, № 1838. P. 109-124.

3. Yuan L., Ma B., Zhu Q., Zhang X., Zhang H., Yua J. Preparation and properties of mullite-bonded porous fibrous mullite ceramics by an epoxy resin gel-casting process // Ceram. Int. 2017. Vol. 43, № 7. P. 5478-5483.

4. Wenzel C., Aneziris G.C., Tsetsekou A. A Study on application of silicon carbide filters for water purification // Proceedings of 10th ECerS conference. Baden-Baden: Göller Verlag; 2007. P. 2073-2078.

5. Cuo Z., Liu H., Zhao F., Li W., Peng S., Chen Y. Highly porous fibrous mullite ceramic membrane with interconnected pores for high performance dust removal // Ceram. Int. 2018. Vol. 44, № 10. P. 11778-11782.

6. Shqau K., Mottern M.L., Yu D., Verweijw H. Preparation and properties of porous - Al2O3 membrane supports // J. Am. Ceram. Soc. 2006. Vol. 89, № 6. P. 1790-1794.

7. Hu X.J., Chen W.D., Huang Y. Fabrication of Pd/ceramic membranes for hydrogen separation based on low-cost macroporous ceramics with pencil coating // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35, № 15. P. 7803-7808.

8. Obradović N., Filipović S., Đorđević N., Kosanović D., Marković S., Pavlović V., Maca K. Effects of mechanical activation and two-step sintering on the structure and electrical properties of cordierite-based ceramics // Ceram. Int. 2016. Vol. 42, № 12. P. 13909-13918.

9. Duan W., Yin X., Luo C., Kong J., Ye F., Pan H. Microwave-absorption properties of SiOC ceramics derived from novel hyperbranched ferrocene-containing polysiloxane // J. Eur. Ceram. Soc. 2017. Vol. 37, № 5. P. 2021-2030.

10. Vernoux P., Guth M., Li X. Ionically conducting ceramics as alternative catalyst supports // Electrochem. Solid-State Lett. 2009. Vol 12, № 7. P. 9-11.

11. Kelly B.A. Why engineer porous materials? // Phil. Trans. R. Soc. A. 2005. Vol. 364. № 1838. P. 5-14.

12. Rambo C.R., Cao J., Seiber H. Preparation of highly porous biomorphic YSZ ceramics // Mater. Chem. Phys. 2004. Vol. 87, № 2-3. P. 345-352.

13. Jones A.C., Arns C.H., Hutmacher D.W., Milthorpe B.K., Sheppard A.P., Knackstedt M.A. The correlation of pore morphology, interconnectivity and physical properties of 3D ceramic scaffolds with bone ingrowth // Biomaterials. 2009. Vol. 30, № 7. P. 1440-1451.

14. Laasri S., Taha M., Laghzizil A., Hlil E.K., Chevalier J. The effect of densification and dehydroxylation on the mechanical properties of stoichiometric hydroxyapatite bioceramics // Mater. Res. Bull. 2010. Vol. 45, № 10. P. 1433-1437.

15. Coi Y.J., Seeley Z., Bandyopadhyay A., Bose S., Akbar S.A. Aluminum doped TiO2 nano-powders for gas sensors // Sens. Actuators B. 2007. Vol. 2, № 1. P. 111-117.

16. Akbar S., Dutta P., Lee Ch. High-temperature ceramic gas sensors: a review // Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2006. Vol. 3, № 4. P. 302-311.

17. Xue W., Huang Y., Xie Z., Liu W. Al2O3 ceramics with well-oriented and hexagonally ordered pores: the formation of microstructures and the control of properties // J. Eur. Ceram. Soc. 2012. Vol. 32, № 12. P. 3151-3159.

18. Tang Y., Miao Q., Qiu S., Zhao K., Hu L. Novel freeze-casting fabrication of aligned lamellar porous alumina with a centrosymmetric structure // J. Eur. Ceram. Soc. 2014. Vol. 34, № 15. P. 4077-4082.

19. Ge H., Wang G., Yuan B., Dong B., Li H. Fabrication and microstructure of porous SiC ceramics using suspension emulsions as pore forming agents // Ceram. Int. 2014. Vol. 40, № 8 (A). P. 11705-11711.

20. Levkov R.V., Zhukov I.A. Buyakova S.P., Kul'kov S.N. Porous ceramics made of aluminum oxide and hydroxide //Polzunovsky vestnik. 2015. № 1. P. 23-25.

21. Zhai L., Cebeci F.C., Cohen R.E., Rubner M.F. Stable superhydrophobic coatings from polyelectrolyte multilayers // Nano Letters. 2004. Vol. 4, № 7. P. 1349-1353.

22. Sviridenok A.I., Krautsevich A.V., Lysenko V.I., Mikulich S.I., Ihnatouski M.I., Bardakhanov S.P. Friction properties of thin coatings based on epilams nanomodified by silica // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, № 3. P. 225-235.

23. Lin K.L., Chang W.C., Lin D.F., Luo H.L., Tsai M.C. Effects of nano-SiO2 and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar // Journal of Environmental Management. 2008. Vol. 88, № 4. 70 p.

24. Quercia G., Brouwers H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures // The 8th fib international PhD symposium in civil engineering. 2010. P. 431-436.

25. Liu X.W., Li J.W., Zhou L., Huang D.S., Zhou Y.P. Adsorption of CO2, CH4 and N2 on ordered mesoporous silica molecular sieve // Chem. Phys. Lett. 2005. Vol. 415, № 4-6. P. 198-201.

26. Jain A., Rogojevic S., Ponoth S., Agarwal N., Matthew I., Gill W.N., Persans P., Tomozawa M., Plawsky J.L., Simonyi E. Porous silica materials as low-k dielectrics for electronic and optical interconnects // Thin Solid Films. 2001. Vol. 398-399. P. 513-522.

27. Nair B.N., Yamaguchi T., Okubo T., Suematsu H., Keizer K., Nako S.I. Sol-gel synthesis of molecular sieving silica membranes // J. Membr. Sci. 1997. Vol. 135, № 2. P. 237-243.

28. Kuzjukevics A., Linderoth S. Grabis J. Characterization of yttria-doped zirconia powders produced by plasma-chemical method // Solid State Ionics. 1996. Vol. 92, № 3-4. P. 253-260.

29. Ghyngazov S.A., Frangulyan T.S. Impact of pressure in static and dynamic pressing of zirconia ultradisperse powders on compact density and compaction efficiency during sintering // Ceram. Int. 2017. Vol. 43, № 18. P. 16555-16559.

30. Surzhikov A.P., Frangylyan T.S., Ghyngazov S.A. A dilatometric study of the effect of pressing on the kinetics of compression of ultrafine zirconium dioxide powders under thermal annealing // Russian Physics Journal. 2012. Vol. 55, № 4. P. 345-352.

31. Bardahanov S.P. The use of high-power accelerators of the ELV type for obtaining nanopowders // Problems of atomic science and technology (PAST). Ser. Nuclear Physics Investigations. 2008. № 5. P. 165-168.

32. Bardahanov S.P. Synthesis of hydrophobized nanopowders of silicon dioxide // Vestnik NSU. Series: Physics. 2013. T. 8, № 1. P. 92-98.

33. Gyngazov S.A., Shevelev S.A. Influence of pressing pressure of compacts from ultradisperse zirconium dioxide powder doped with bismuth oxide on the sealing efficiency during thermal sintering and mechanical properties of sintered ceramics //Russian Physics Journal. 2017. T. 60, № 10. P. 181-184.