

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.9; 666.3; 666.3.017; 666.3.046.4; 666.3.032.652

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.003

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ УГЛЕРОДА НА УПЛОТНЕНИЕ ПОРОШКОВ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ПРЕССОВАНИИ И СПЕКАНИИ

Сергей Анатольевич Гынгазов^{1†}, Иван Петрович Васильев²,
Валерия Александровна Болтуева³

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, 634050, Томск, Россия

¹ ghyngazov@tpu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-2524-9238>

² zarkvon@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4077-7012>

³ kostenkova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8128-9042>

Аннотация. Циркониевая керамика обладает высокими функциональными и прочностными свойствами. Области ее применения постоянно расширяются. Использование нанопорошков позволяет получить мелкозернистую керамику с улучшенными свойствами. Диоксид циркония обладает высокой твердостью, что вызывает повышенный износ пресс-форм. Кроме того, наночастицы склонны к агломерированию, что влияет на уплотнение при компактировании и спекании. Данные проблемы можно решить путём введения микродобавок. Одной из таких добавок является углерод. Целью настоящей работы является исследование влияния вида добавки углерода и его концентрации на параметры циркониевой керамики из порошкового сырья, полученного золь-гель и плазмохимическим методами. Методом дилатометрии была исследована усадка образцов двух типов керамики с тремя типами добавки углерода, представляющие из себя многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), аморфный углерод, а также аморфный углерод с присутствием МУНТ. Определено, что введение добавки не оказывает влияния на скорость усадки, и наибольшая скорость усадки образца практически не отличается от таковой для спекания керамики без добавок. Определено влияние добавки углерода на плотность и микротвёрдость керамики. Введение добавок в керамику, из порошков, полученных по золь-гель технологии, вызывает снижение плотности и микротвёрдости, в то время как плотность керамики из плазмохимических порошков увеличивается до некоторого порогового значения концентрации добавок, что справедливо для всех типов углерода, рассмотренных в данном исследовании.

Ключевые слова: частично стабилизированный диоксид циркония, добавки, углерод, многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), дилатометрия.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №22-19-00183).

Для цитирования: Гынгазов С.А., Васильев И.П., Болтуева В.А. Влияние добавки углерода на уплотнение порошков частично стабилизированного диоксида циркония при прессовании и спекании // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 445–453. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.003.

Original article

INFLUENCE OF THE ADDITIVE CARBON ON THE COMPACTION OF POWDERS OF PARTIALLY STABILIZED ZIRCONIA DIOXIDE DURING PRESSING AND SINTERING**Sergei A. Ghyngazov^{1†}, Ivan P. Vasil'ev², Valeria A. Boltueva³**^{1,2,3} National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Pr., 30, Tomsk, 634050, Russia¹ ghyngazov@tpu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-2524-9238>² zarkvon@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4077-7012>³ kostenkova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8128-9042>

Abstract. Zirconia ceramics has high functional and strength properties. Its fields of application are constantly expanding. The use of nanopowders makes it possible to obtain fine-grained ceramics with improved properties. Zirconium dioxide has a high hardness. This causes increased mold wear. In addition, nanoparticles are prone to agglomeration. This affects compaction during compaction and sintering. These problems can be solved by introducing microadditives. One such additive is carbon. The purpose of this work is to study the influence of the type of carbon addition and its concentration on the parameters of zirconium ceramics from powder raw materials, which is obtained by sol-gel and plasma-chemical methods. The shrinkage of samples of two types of ceramics with three types of carbon addition was studied by dilatometry. They are multiwalled carbon nanotubes (MWNTs), amorphous carbon, and also amorphous carbon with the presence of MWCNTs. We have determined that the introduction of additives does not affect the shrinkage rate, and the highest shrinkage rate of the sample is almost equal to the shrinkage rate during ceramic sintering without additives. We have determined the effect of carbon addition on the density and microhardness of ceramics. The introduction of additives into ceramics from powders obtained by sol-gel technology causes a decrease in density and microhardness. The density of ceramics from plasma-chemical powders increases to a certain threshold value of the concentration of additives. This is true for all types of carbon considered in this study.

Keywords: partially stabilized zirconia, additive, carbon, multiwalled carbon nanotubes (MWCNT), dilatometry.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-19-00183).

For citation: Ghyngazov, S. A., Vasil'ev, I. P. & Boltueva, V. A. (2022). Influence of the additive carbon on the compaction of powders of partially stabilized zirconia dioxide during pressing and sintering. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 445–453. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.003.

Введение

Керамические материалы в силу их высоких функциональных и прочностных свойств широко используются в технике. Процесс изготовления керамических изделий, как правило, завершается обжигом сырой заготовки при высокой температуре, что является необходимым условием получения качественной плотной керамики [1]. Высокая температура в процессе длительной изотермической выдержки обеспечивает эффективность процесса уплотнения порошковых компактов. Среди наиболее востребованных в науке и технике керамик лидирующее место занимает керамика на основе диоксида циркония [2]. Области ее применения постоянно расширяются, поэтому интерес к ней на современном этапе развития техники не только не ослабевает, но и усиливается. Частично этому способствует использование в качестве исходного сырья керамических нанопо-

рошков [3, 4]. Считается, что использование такого сырья необходимо для получения мелкозернистой керамики с новыми улучшенными свойствами [5, 6]. Способы получения керамических нанопорошков разнообразны. Наибольший интерес представляют золь-гель [7] и плазмохимический [8] методы, которые наиболее пригодны для промышленного получения порошкового сырья. В керамической технологии особая роль уделяется вопросам компактирования и спекания полученных компактов [9]. В силу высокой твердости порошков диоксида циркония металлические пресс-формы быстро выходят из строя, что затрудняет реализацию технологических процессов получения порошковых компактов. Склонность наночастиц к агломерированию [10, 11], повышенная их сорбционная способность заметно сказываются на процессах их уплотнения в компактах при компактировании и последующем спекании [12].

Часто, несмотря на наноразмерность порошка, компакты плохо компатируются, что проявляется в механическом разрушении образцов при выпрессовке, и спекаются, что препятствует получению плотной нанокерамики [10]. Традиционным и оправданным подходом для преодоления этих проблем является использование различных микродобавок, которые при введении в основную порошковую керамическую массу в малом количестве заметно влияют на все технологические аспекты компактирования [13] и спекания [14]. Работы по исследованию влияния всевозможных добавок на спекание керамики представлены в современной литературе в большом количестве [15-18]. Одной из часто используемых добавок является углерод [19-21]. Для того, чтобы использование добавки существенно не сказывалось на стоимости керамических изделий, важно использовать доступные недорогие углеродные порошки или использовать углеродные порошки, которые получаются в виде сопутствующего продукта какого-либо технологического процесса. Сам углерод очень удобен для использования в виде микродобавок. Это обусловлено тем, что его введение может решить сразу несколько задач. Это, прежде всего, облегчение процессов компактирования и извлечения компактов из пресс-форм, предотвращение повышенного износа рабочих поверхностей пресс-форм. Имеются данные [22], что в небольших количествах углерод улучшает качество процесса усадки компактов при спекании и это проявляется в получении высокоплотной керамики. Несомненным достоинством данного вида добавки является его способность покидать объем керамики на завершающей стадии спекания. В результате получаемая керамика свободна от загрязняющих примесей. Несмотря на значительное количество работ, посвященных использованию углерода в качестве микродобавок, данные о виде углеродных частиц, влиянию их концентрации на эффективность процесса спекания и качество керамики являются редкими и не системными.

Цель настоящего исследования заключается в установлении закономерностей влияния вида добавки углерода и его концентрации на характеристики циркониевой керамики и эффективность использования такого вида добавки при получении керамики из порошкового сырья, полученного золь-гель методом и методом плазмохимии.

Методическая часть

В качестве исходного сырья для получения керамики использовали коммерческий нанопорошок частично стабилизированного диоксида циркония (3 мол.% Y_2O_3) марки TZ-3Y-E (ТО-SOH, Япония) (Порошок 1) и плазмохимический порошок ПЦИ-8 (Порошок 2), произведенный на Сибирском химическом комбинате (СХК) методом разложения водных растворов азотнокислых солей циркония в плазме высокочастотного разряда. Спекаемая из Порошка 1 и Порошка 2 керамика далее обозначается как керамика Тип 1 и керамика Тип 2 соответственно. Выбор этих типов порошков обусловлен широким использованием технологий их получения в мире. Мы предполагаем, что проведение экспериментов по введению углеродных добавок в порошки, полученные разными способами, позволит выявить общие закономерности влияния углерода, которые не зависят от истории получения порошка диоксида циркония, а значит от его микроструктурных, размерных и других факторов.

В качестве добавок использовали углеродные нанотрубки, полученные в Институте катализа СО РАН (Добавка 1) [23], порошки активированного угля (Activated carbon) промышленного изготовления для медицины (Добавка 2), нанопорошки углерода, являющиеся сопутствующим продуктом при получении водорода из природного газа в СВЧ-разряде [24] (Добавка 3). Содержание добавки в образцах составляло 0,5 %, 1%, 5 % (масс.) для Добавки 1, 1 %, 5 %, 9 %, 15 %, 20 %, 25 % (масс.) для Добавки 2, 1 %, 5 % (масс.) – для Добавки 3. Выбор разных типов добавок углерода, отличающихся способом получения, также преследует цель выявить общие характерные именно для углерода закономерности влияния на процессы компактирования и спекания циркониевой керамики. Порошковые смеси подвергались механической обработке в планетарной мельнице Emax (RETSCH, Германия) в присутствии воды (масса воды равна массе порошков, масса мелющих шаров равна десятикратной массе порошков). После чего смеси выдерживали в сушильном шкафу при температуре 70 °С и просеивали через сито. Порошковые компакты в виде таблеток диаметром 9 мм и толщиной 2,5-3 мм получали с использованием лабораторного пресса ППР-10 при давлении прессования 80-200 МПа. Спекание керамики

проводили в течение часа на воздухе в печи СНОЛ 12/16 при температуре 1400 °С или в объеме дилатометра DIL402C (Netzsch, Германия) при тех же температурных режимах. Открытую пористость и плотность керамики определяли методом гидростатического взвешивания на высокоточных весах Shimadzu AUW-220D. Полную пористость керамики определяли по данным РФА и плотности, определенной экспериментально. Микроструктуру порошков и керамики определяли методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEOL JEM – 2100F. Для определения микротвердости керамики использовали микротвердомер фирмы Zwick (Германия). Фазовый состав определяли при помощи рентгеновского дифрактометра ARL X'tra.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Характеристики используемых добавок.

Добавка 1 представляла собой многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ). Согласно сведениям от производителя диаметр МУНТ примерно равен 9,4 нм. Добавка 2 (активированный уголь) согласно справочным данным представляет собой аморфный высокопористый углерод с удельной поверхностью на 1 грамм от 500 до 2200 м². Добавка 3 представляет собой смесь аморфного и кристаллического углерода с крайне низкой насыпной плотностью. Проведенный элементный анализ показал, что Добавка 3 состоит преимущественно из углерода (97,3 %) и кислорода (2,7 %). Других примесей обнаружено не было. Результаты рентгенофазового анализа (РФА) для Добавки 3 представлены на рис.1.

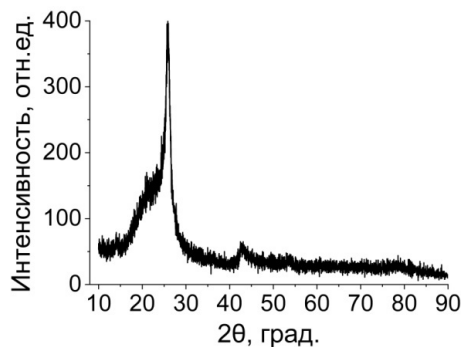


Рис.1. Дифрактограмма Добавки 3

Fig.1. X-ray diffraction pattern of Additive 3

Как видно из рис.1, помимо аморфного углерода в Добавке 3 имеется некоторое содержание кристаллической фазы. Пик на дифрактограмме (рис.1) можно объяснить наличием в массе порошка МУНТ.

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (рис.2) Добавка 3 представляет собой нанопорошок со средним размером частиц не более 100 нм.

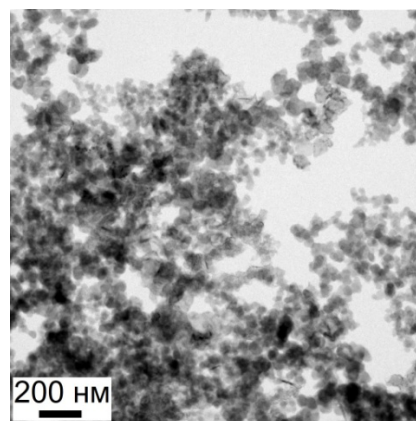


Рис.2. Просвечивающая электронная микроскопия Добавки 3

Fig.2. Transmission electron microscopy of Additive 3

Прессование порошковых компактов.

Независимо от давления прессования порошковые компакты из Порошка 1 и 2 без добавок имели дефекты в виде трещин и расслаивания образцов. Это можно связать с повышенным пристеночным трением в пресс-форме при компактировании и выпрессовке образцов. Ситуация значительно улучшается при введении в порошковые массы углеродных добавок. Образцы в широком диапазоне давлений прессования получаются бездефектными. При этом наблюдался пониженный износ внутренних поверхностей пресс-формы.

Спекание керамики. Спекание керамики Тип 1 и Тип 2 без добавок.

На рис.3 представлены кривые усадки компактов из Порошка 1 (кривая 1) и Порошка 2 (кривая 2). Рис.3 показывает, что на стадии нагрева, до начала усадки кривая спекания компакта из Порошка 1 (кривая 1) характеризуется большим линейным расширением по сравнению с кривой спекания компакта из Порошка 2 (кривая 2). На стадии активной усадки наибольшая скорость уплотнения Порошка 1, определенная из производной кривой 1 (кривая 3), наблюдается при температуре $T_{м1} = 1256$ °С.

Для Порошка 2 наибольшая скорость наблюдается при более высокой температуре $T_{M2} = 1267,5$ °С (определена из кривой 4 производной от кривой 2). Отличия в поведении кривых спекания для обоих порошков обусловлены разной технологией их получения, и соответственно структурой и морфологией исходных порошков.

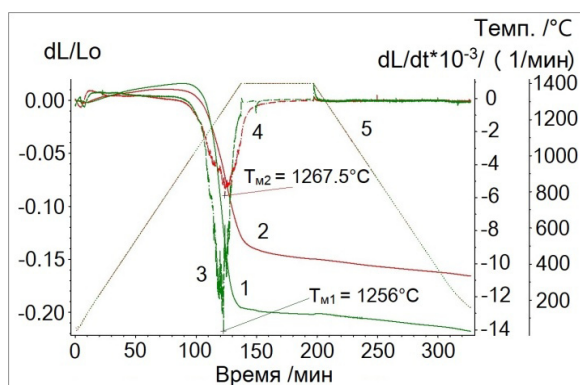


Рис.3. Кривые спекания компактов из Порошков 1 (кривая 1) и 2 (кривая 2), 3 и 4 – производные кривых 1 и 2 соответственно, 5 – температурная программа

Fig.3. Sintering curves of compacts from Powders 1 (curve 1) and 2 (curve 2), 3 and 4 are the derivatives of curves 1 and 2, respectively, 5 is the temperature program

Спекание керамики Тип 1 и Тип 2 с добавками углерода.

На рис.2 представлены кривые спекания для компактов из Порошка 1 без добавки (кривая 1) и с добавками 1 (кривая 2) и 2 (кривая 3) в количестве 1 %.

Как видно из вида кривых спекания, представленных на рис.4, введение Добавки 1 или 2 не влияет на скорость усадки. Наклон кривых в интервале температуры нагрева 1100 – 1300 °С одинаков, а наибольшая скорость усадки, независимо от типа добавки углерода и без нее приходится на температуру близкую к температуре для чистого порошка 1 (1256 °С). На кривой 2 до температуры нагрева около 500 °С наблюдается расширение образца в большей степени, чем для прессовки без добавки. Это повышенное расширение происходит из-за интенсивного выгорания углеродной добавки. Увеличение концентрации Добавки 1 и 2 приводит к еще большему расширению в данном диапазоне (рис.5), что подтверждает данное утверждение.

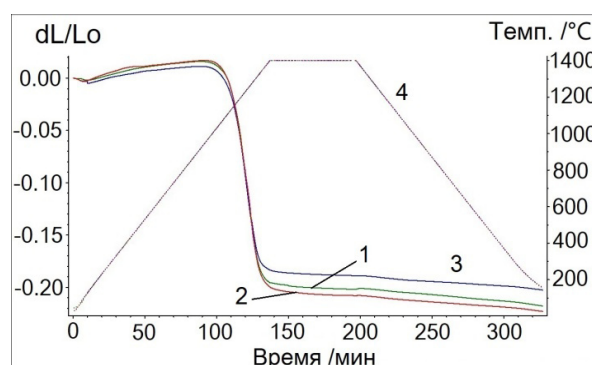


Рис.4. Кривые спекания компактов Порошка 1 без добавки (кривая 1) и с Добавкой 1 (кривая 2) и 2 (кривая 3) в количестве 1%, 4 – температурная программа

Fig.4. Sintering curves of Powder compacts 1 without additive (curve 1) and with Additive 1 (curve 2) and 2 (curve 3) in the amount of 1%, 4 – temperature program

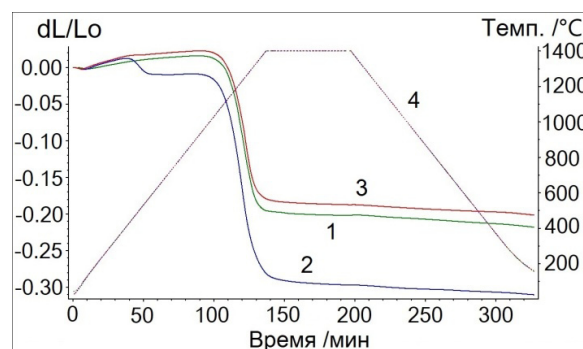


Рис.5. Кривые спекания Порошка 1 без добавки (кривая 1) и с Добавкой 1 (кривая 2) и с Добавкой 2 (кривая 3) в количестве 5 %, 4 – температурная программа

Fig.5. Sintering curves of Powder 1 without additive (curve 1) and with Additive 1 (curve 2) and with Additive 2 (curve 3) in the amount of 5 %, 4 – temperature program

Влияние углеродных добавок на микротвердость и плотность керамики.

На рис.6 представлены результаты измерения плотности керамик Тип 1 и Тип 2 в зависимости от количества добавки 1, 2 и 3. Из рис.6 следует, что для керамики типа 1 с увеличением количества добавки углерода имеет место снижение плотности, в то время как для керамики Тип 2 имеет место рост плотности при концентрациях добавки до 1 % (масс.), что характерно для всех типов добавок.

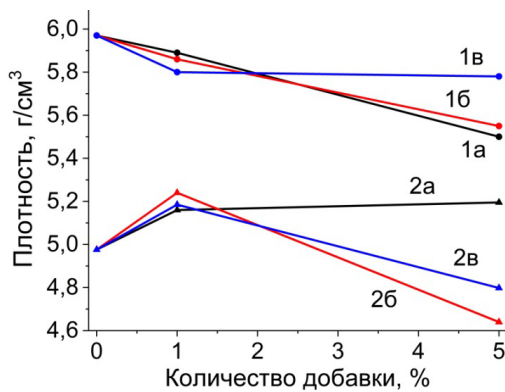


Рис.6. Зависимость плотности керамики

Тип 1 и Тип 2 от количества добавки:

1a – Тип 1, Добавка 1; 1б – Тип 1, Добавка 2;
1в – Тип 1, Добавка 3; 2a – Тип 2, Добавка 1;
2б – Тип 2, Добавка 2; 2в – Тип 2, добавка 3

Fig.6. Dependence of ceramic density

Type 1 and Type 2 from the amount of additive:

1a – Type 1, Additive 1; 1b – Type 1, Additive 2;
1b – Type 1, Additive 3; 2a – Type 2, Additive 1;
2b – Type 2, Additive 2; 2b – Type 2, additive 3

Микротвердость керамики Тип 1 ведет себя аналогично плотности: при увеличении концентрации добавки углерода, твердость керамики снижается. Для керамики Тип 2 также характерно снижение микротвердости при увеличении количества добавки, несмотря на некоторый рост плотности. Данные зависимости представлены на рис.7.

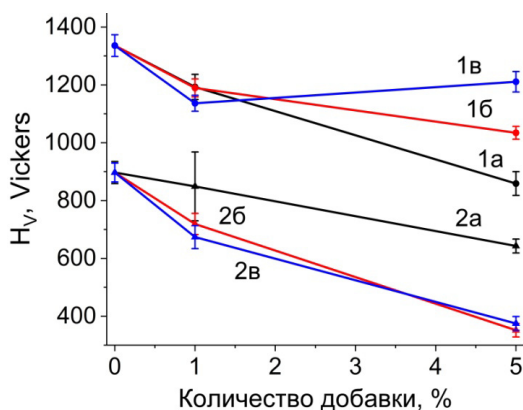


Рис.7. Зависимость микротвердости (H_V)

керамики Тип 1 и Тип 2 от количества добавки:

1a – Тип 1, Добавка 1; 1б – Тип 1, Добавка 2;
1в – Тип 1, Добавка 3; 2a – Тип 2, Добавка 1;
2б – Тип 2, Добавка 2; 2в – Тип 2, добавка 3

Fig.7. Dependence of microhardness (H_V) of ceramics

Type 1 and Type 2 on the amount of additive:

1a – Type 1, Additive 1; 1b – Type 1, Additive 2;
1b – Type 1, Additive 3; 2a – Type 2, Additive 1;
2b – Type 2, Additive 2; 2b – Type 2, additive 3

Из рис.6 и 7 следует, что введение добавок углерода независимо от истории их получения заметно отличается по влиянию на свойства керамики, изготовленной из Порошка 1 и Порошка 2. Для плазмохимических порошков (Порошок 2) можно подбором концентрации углеродной добавки добиться увеличения плотности керамики.

Выводы

Проведенные исследования показали, что введение углеродной добавки преимущественно влияет на качество процесса компактирования зеленых образцов и протекания первой фазы уплотнения при температуре до 500 °С. Согласно данным [22] на этой стадии углерод выгорает не полностью. Заключительное выгорание происходит при более высокой температуре. Этим можно объяснить факт повышения пористости керамики с повышением добавки углерода. Повышение пористости сопровождается уменьшением плотности, что приводит одновременно к снижению твердости керамики. Повышение пористости следует связать с заключительной высокотемпературной стадией выгорания углерода, когда образующиеся газы продукты выгорания углерода препятствуют уплотнению керамики в процессе спекания. Таким образом, введение добавки углерода может быть использовано для задания определенной керамики с заданной пористостью, включая высокопористую.

При концентрациях добавки углерода не более 10 % можно добиться заметного улучшения качества процесса получения компактов при сохранении высокого качества керамики. Для некоторых типов порошкового сырья, например, полученного методом плазмохимии введением углеродной добавки можно добиться улучшения свойств спеченной керамики.

Таким образом, добавку углерода можно считать перспективной для использования в керамическом производстве. Согласно имеющимся литературным данным наиболее перспективно использовать добавку углерода в сочетании с другими добавками, например, с легкоплавкими оксидами металлов. В этом направлении планируется продолжить исследования.

Список литературы

1. Patil S., Patil D.R., Jung I.C., Ryu J. Effect of cooling rates on mechanical properties of alumina-toughened zirconia composites // *Ceramics International*. 2022. V. 48, N 14. P. 21048–21053.
2. Arena A., Prete, F., Rambaldi, E., Bignozzi, M.C., Monaco C., Di Fiore A., Chevalier J. Nanos-structured Zirconia-Based Ceramics and Compos-ites in Dentistry: A State-of-the-Art Review // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. P. 1393.
3. Porozova S.E., Rogozhnikov A.G., Shokov V.O. et al. Optimization of Sol-Gel Conditions for Producing Zirconium Dioxide Nanopowders // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021. V. 61. P. 659–664.
4. Gevorkyan E., Prikhna T., Vovk R., Rucki M., Siemiątkowski Z., Kucharczyk W., Chishkala V., Chałko L. Sintered nanocomposites ZrO₂-WC obtained with field assisted hot pressing // *Composite Structures*. 2021. V. 259. Article No 113443.
5. Yu Y., Lin F., Zheng Y., Yin H., He, X. High-density nanoprecipitation mechanism and microstructure evolution of high-performance Al₂O₃/ZrO₂ nanocomposite ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. V. 41, N 10. P. 5269–5279.
6. Yu W., Zheng Y., Yu Y., Liu X., Yuan Y. The microstructure, formation mechanism and sintering characteristics of Al₂O₃/ZrO₂ supersaturated solid solution powders // *Ceramics International*. 2021. V. 47, N 18. P. 25264–25273.
7. Peng D., Wang X., Ren Y. et al. Novel process of preparation of Ytria stabilized ZrO₂ small sizes beads using sol-gel method combined with spray granulation technology // *J Sol-Gel Sci Technol*. 2022. V. 103. P. 62–73.
8. Chuklina S.G., Pylinina A.I., Khoroshilov V.V. Thermal and plasmochemical activation of the zirconia-supported copper catalyst for ethanol dehydrogenation // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017. V. 91, N 5. P. 862–865.
9. Indra A., Putra A.B., Handra N., Affi J., Gunawarman, Behavior of sintered body properties of hydroxyapatite ceramics: effect of uniaxial pressure on green body fabrication // *Materials Today Sustainability*. 2022. V. 17. Article No 100100.
10. Mysiura I., Kalantaryan O., Kononenko S., Zhurenko V., Bogatyrenko S. Application of radio-luminescence technique for zirconia powder and nanoceramics // *IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*. 2017. Article No 02MAN06-1-02MAN06-4.
11. Xiong Y., Wang L., Liu C. Densification Behaviors in the Early Stage of Spark Plasma Sintering of 3Y-TZP Nanoceramics // *In Key Engineering Materials*. 2016. V. 697. P. 173–177.
12. Di Z., Shimai S., Zhao J., Mao X., Zhang J., Zhou G., Liu J., Wang S. Dewatering of spontaneous-coagulation-cast alumina ceramic gel by filtering with low pressure // *Ceramics International*. 2019. V. 45, N 10. P. 12789–12794.
13. Ghyngazov S.A., Vasiljev I.P., Gyngazov A.S., Karabekova D.Zh. The Effect of Plasticizers and Moisture on the Pressing Process and the Properties of Ceramic Products Based on Zirconium Dioxide // *Russian Physics Journal*. 2021. V. 63, N 11. P. 2037–2040.
14. Zhigachev A.O., Rodaev V.V., Zhigacheva D.V. The effect of titania doping on structure and mechanical properties of calcia-stabilized zirconia ceramic // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. V. 8, N 6. P. 6086–6093.
15. Ling Y., Hao X., Zhang S., Chen J., Gao L., Omran M., Chen G. Crystal structure and morphology of CeO₂ doped stabilized zirconia ceramics under high-frequency microwave field sintering // *Ceramics International*. 2022. V. 48, N 8. P. 10547–10554.
16. Liu Y., Fei Y., Wang Z., Xu J. Evaluation of mechanical properties of YSZ TBCs doped by different ratios of Eu³⁺ ions after isothermal oxidation // *Ceramics International*. 2022. V. 48, N 13. P. 18257–18269.
17. Al-Amin M., Mumu H.T., Sarker S. Effects of sintering temperature and zirconia content on the mechanical and microstructural properties of MgO, TiO₂ and CeO₂ doped alumina-zirconia (ZTA) ceramic // *Journal of the Korean Ceramic Society. Soc*. 2022.
18. Kumar A., Kumar P., Dhaliwal A.S. Phase transformation behavior of Ca-doped zirconia sintered at different temperatures // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2022. V. 59, N 3. P. 370–382.
19. Jang B.-K., Lee J.-H., Fisher C.A.J., Mechanical properties and phase-transformation behavior of carbon nanotube-reinforced yttria-stabilized zirconia composites // *Ceramics International*. 2021. V. 47, N 24. P. 35287–35293.
20. Milsom B., Porwal H., Viola G., Gao Z., Reece M.J., Understanding and quantification of grain growth mechanism in ZrO₂-carbon nanotube

composites // *Materials & Design*. 2017. V. 133. P. 325–331.

21. Obradović N., Kern F. Properties of 3Y-TZP zirconia ceramics with graphene addition obtained by spark plasma sintering // *Ceramics International*. 2018. V. 44, N 14. P. 16931–16936.

22. Restivo T.A.G., Durazzo M., de Mello-Castanho S.R.H. Low-temperature densification of ceramics and cermets by the intermediary stage activated sintering method // *Journal Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. V. 131. P. 249–258.

23. Kazakova M.A., Moseenkov S.I., Golubtsov G.V., Korovin E.Yu., Ishchenko A.V., Selyutin A.G., Zavorin A.V., Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Kuznetsov V.L., Structural and electromagnetic properties of Fe₂Co-multi-walled carbon nanotubes-polystyrene based composite // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 844. Article No 156107.

24. Жерлицын А.Г., Корженко Д.В., Шиян В.П. Получение водорода из природного газа в плазме СВЧ-разряда при атмосферном давлении // *Газовая промышленность*. 2018. № 11. С. 777.

Информация об авторах

С. А. Гынгазов – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Томского политехнического университета.

И. П. Васильев – кандидат технических наук, научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Томского политехнического университета.

В. А. Болтуева – младший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Томского политехнического университета.

References

1. Patil, S. & Patil, D. R. (2022). Effect of cooling rates on mechanical properties of alumina-toughened zirconia composites. *Ceramics International*, (48), 21048–21053.

2. Arena, A. & Prete, F. (2019). Nanostructured Zirconia-Based Ceramics and Composites in Dentistry: A State-of-the-Art Review. *Nanomaterials*, (9), 1393.

3. Porozova, S. E. & Rogozhnikov, A. G. (2021). Optimization of Sol-Gel Conditions for Producing Zirconium Dioxide Nanopowders. *Refractories and Industrial Ceramics*, (61), 659–664.

4. Gevorkyan, E. & Prikhna, T. (2021). Sintered nanocomposites ZrO₂-WC obtained with field assisted hot pressing. *Composite Structures*, (259), 113443.

5. Yu. Y., Lin. F. (2021). High-density nanoprecipitation mechanism and microstructure evolution of high-performance Al₂O₃/ZrO₂ nanocomposite ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, (41), 10, 5269–5279.

6. Yu W., Zheng Y. (2021). The microstructure, formation mechanism and sintering characteristics of Al₂O₃/ZrO₂ supersaturated solid solution powders. *Ceramics International*, (47), 25264–25273.

7. Peng D., & Wang X. (2022). Novel process of preparation of Yttria stabilized ZrO₂ small sizes beads using sol-gel method combined with spray granulation technology *Journal Sol-Gel Science Technology*, (103), 62–73.

8. Chuklina, S. G., Pylinina, A. I. (2017). Thermal and plasmochemical activation of the zirconia-supported copper catalyst for ethanol dehydrogenation. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, (91), 862–865.

9. Indra A. & Putra A.B. (2022). Behavior of sintered body properties of hydroxyapatite ceramics: effect of uniaxial pressure on green body fabrication. *Materials Today Sustainability*, (17), 100100.

10. Mysiura, I. & Kalantaryan, O. (2017). Application of radioluminescence technique for zirconia powder and nanoceramics. *IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*, 02MAN06-1-02MAN06-4.

11. Xiong, Y. & Wang, L. (2016). Densification Behaviors in the Early Stage of Spark Plasma Sintering of 3Y-TZP Nanoceramics. *In Key Engineering Materials*, (697), 173–177.

12. Di, Z. & Shimai, S. (2019). Dewatering of spontaneous-coagulation-cast alumina ceramic gel by filtrating with low pressure. *Ceramics International*, (45), 12789–12794.

13. Gyngazov, S. A. & Vasiljev, I. P. (2021). The Effect of Plasticizers and Moisture on the Pressing Process and the Properties of Ceramic

Products Based on Zirconium Dioxide. *Russian Physics Journal*, (63), 2037–2040.

14. Zhigachev, A. O. & Rodaev, V. V. (2019). The effect of titania doping on structure and mechanical properties of calcia-stabilized zirconia ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, (8), 6086–6093.

15. Ling, Y., Hao, X., Zhang, S., Chen, J., Gao, L., Omran, M. & Chen, G. (2022). Crystal structure and morphology of CeO₂ doped stabilized zirconia ceramics under high-frequency microwave field sintering. *Ceramics International*, 8(48), 10547–10554.

16. Liu, Y. & Fei, Y. (2022). Evaluation of mechanical properties of YSZ TBCs doped by different ratios of Eu³⁺ ions after isothermal oxidation. *Ceramics International*, (48), 18257–18269.

17. Al-Amin, M. & Mumu, H. T. (2022). Effects of sintering temperature and zirconia content on the mechanical and microstructural properties of MgO, TiO₂ and CeO₂ doped alumina-zirconia (ZTA) ceramic. *Journal of the Korean Ceramic Society. Soc.*

18. Kumar, A. & Kumar, P. (2022). Phase transformation behavior of Ca-doped zirconia sintered at different temperatures. *Journal of the Korean Ceramic Society*, (59), 370–382.

19. Jang, B.-K. & Lee, J.-H. (2021). Mechanical properties and phase-transformation behavior of carbon nanotube-reinforced yttria-stabilized zirconia composites. *Ceramics International*, (47), 35287–35293.

20. Milsom, B. & Porwal, H. (2017). Understanding and quantification of grain growth mechanism in ZrO₂-carbon nanotube composites. *Materials & Design*, (133), 325–331.

21. Obradović, N. & Kern, F. (2018). Properties of 3Y-TZP zirconia ceramics with graphene addition obtained by spark plasma sintering. *Ceramics International*, (44), 16931–16936.

22. Restivo, T. A.G. & Durazzo, M. (2018). Low-temperature densification of ceramics and cermets by the intermediary stage activated sintering method. *Journal Thermal Analysis and Calorimetry*, (131), 249–258.

23. Kazakova, M. A. & Moseenkov, S. I. (2020). Structural and electromagnetic properties of Fe₂Co-multi-walled carbon nanotubes-polystyrene based composite. *Journal of Alloys and Compounds*, (844), 156107.

24. Zherlitsyn, A. G. & Korzhenko, D. V. (2018). Obtaining a manifestation due to the presence of gas in the plasma of a microwave discharge in an atmospheric measurement. *Gas industry*, (11), 777. (In Russ.).

Information about the authors

S. A. Ghyngazov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors Research School of Physics of High-Energy Processes, Tomsk Polytechnic University.

I. P. Vasil'ev – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors Research School of Physics of High-Energy Processes, Tomsk Polytechnic University.

V. A. Boltueva – Junior Researcher at the Problematic Research Laboratory of Electronics, Dielectrics and Semiconductors Research School of Physics of High-Energy Processes, Tomsk Polytechnic University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.11.2022; одобрена после рецензирования 18.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was received by the editorial board on 08 Nov. 22; approved after reviewing 18 Nov. 22; accepted for publication 25 Nov. 22.