

## ПЛАСТИФИКАЦИЯ ЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ, УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ, ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

П.Н. Овчинников

ovchinnikov.pyotr@mail.ru

Н.Ю. Ефремова

netimfi@gmail.com

Д.Г. Жигачева

dashadansec@mail.ru

В.М. Васюков

space-1985@mail.ru

В.В. Родаев

rodaev1980@mail.ru

А.А. Дмитриевский

aadmitr@yandex.ru

ТГУ им. Г.Р. Державина, Тамбов, Российская Федерация

---

### Аннотация

Цель работы — исследование особенностей деформации при комнатной температуре методом одноосного сжатия циркониевой керамики (стабилизированной оксидом кальция), упрочненной оксидом алюминия, с различным содержанием диоксида кремния ( $\text{CaO-ATZ+SiO}_2$ ). Обнаружено, что введение добавки  $\text{SiO}_2$  к  $\text{CaO-ATZ}$ -керамике обеспечивает проявление признаков пластичности при комнатной температуре, а именно возникновение стадии текучести на диаграммах нагружения. Наиболее ярко пластификация проявляется при содержании диоксида кремния 4 мол. %. При этом пластическая деформация (рассчитанная как разность деформаций, соответствующих пределу прочности и условному пределу текучести) достигает значения 0,79 %. Кроме того, введение добавки  $\text{SiO}_2$  (концентрацией 2 мол. %) вызывает повышение предела прочности при сжатии до значения 2,66 ГПа и предельной деформации до значения 1,79 %. Показано, что превышение порогового значения концентрации  $\text{SiO}_2$  (более 4,5 мол. %) вызывает резкое охрупчивание  $\text{CaO-ATZ+SiO}_2$ -керамики. Обнаруженная пластичность керамики при комнатной температуре объясняется повышением трансформируемости тетрагональной фазы диоксида циркония, что способствует усилению роли трансформационного механизма упрочнения. Достигнутый при комнатной температуре запас пластичности композиционной керамики

### Ключевые слова

*Циркониевые керамики, прочностные свойства, пластическая деформация, фазовые превращения*

на основе диоксида циркония обеспечивает перспективу расширения области ее практических приложений

Поступила 15.06.2022

Принята 29.06.2022

© Автор(ы), 2023

*Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ им. Г.Р. Державина. Работа поддержана РНФ (грант № 22-29-00119, <https://rscf.ru/project/22-29-00119>) и Минобрнауки России в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709 (уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037)*

**Введение.** Композитная циркониевая керамика, упрочненная оксидом алюминия (ATZ), имеет широкий спектр применения в силу уникальных свойств [1, 2]. Керамика на основе  $ZrO_2$  обладает такими преимуществами, как высокие трещиностойкость, износостойкость и прочность на изгиб, но имеет сравнительно низкую твердость. При низкой вязкости разрушения керамика на основе  $Al_2O_3$  имеет высокие твердость, прочность на сжатие и модуль Юнга. В композите ATZ ее недостатки компенсируются положительными свойствами друг друга. Высокие показатели механических свойств ATZ-керамики обеспечиваются за счет трансформационного [2, 3] и дисперсионного механизмов упрочнения [4], а также переноса нагрузки [5].

Наряду с преимуществами, ATZ-керамика имеет два существенных недостатка: 1) не поддается деформации при температуре менее  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , т. е. хрупко разрушается [6]; 2) плохо сопротивляется низкотемпературной дегградации [7]. Эти недостатки ограничивают спектр ее практических приложений. В целях расширения области применимости ATZ-керамики необходимо обеспечить ее запас пластичности при комнатной температуре и повысить стойкость к низкотемпературной дегградации. Повышению стойкости циркониевой керамики и композитов на ее основе к низкотемпературной дегградации способствует переход от  $Y_2O_3$  («классического» стабилизатора тетрагональной фазы  $t\text{-}ZrO_2$ ) к его аналогам CaO или  $CeO_2$  [6–9]. На соотношение прочности и пластичности (твердости и вязкости разрушения) материалов существенно влияет легирование специальными добавками и воздействие физических полей [10–16]. Возможность наблюдения пластической деформации (достигающей 1 %) при комнатной температуре в испытаниях на четырехточечный изгиб ATZ-керамики (стабилизированной оксидом церия) с добавкой  $SrAl_{12}O_{19}$  показана в [6, 17]. Неупругое поведение  $CeO_2\text{-}ATZ\text{+}SrAl_{12}O_{19}$  авторы работ [6, 17] связывают с механоиндуцированными тетрагонально-моноклинными превращениями в области растягивающих напряжений, сопровождающимися увеличе-

нием объема материала и обеспечивающими его целостность до указанных выше деформаций. Роль добавки  $\text{SrAl}_2\text{O}_9$  в наблюдаемом явлении до сих пор остается невыясненной. Вместе с тем полученные ранее данные [18, 19] свидетельствуют о том, что легирование ATZ-керамики (стабилизированной оксидом кальция) диоксидом кремния (в концентрации 4...5 мол. %) обеспечивает повышение механоиндуцированной трансформируемости тетрагональной фазы диоксида циркония и увеличение соотношения твердости и вязкости разрушения ( $H = 10,9$  ГПа,  $K_C = 12,43$  МПа · м<sup>1/2</sup>). Отметим, что использование CaO в качестве стабилизатора тетрагональной фазы диоксида циркония в ATZ-керамике способствует многократному увеличению стойкости ее фазового состава (и, соответственно, механических свойств) к низкотемпературной деградации [20].

В связи с изложенным *цель работы* — исследование особенностей деформации методом одноосного сжатия при комнатной температуре CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамики с различным содержанием диоксида кремния.

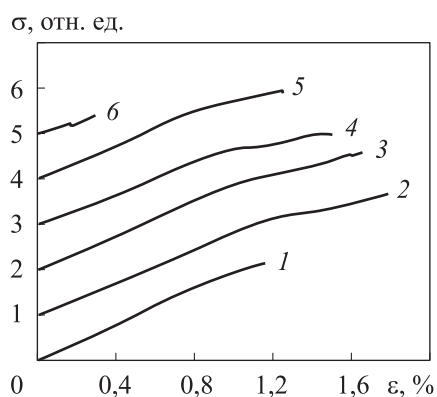
**Материалы и методы решения задач, принятые допущения.** Образцы CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамики изготавливали с использованием порошков ZrO<sub>2</sub> (Sigma-Aldrich), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hongwu), CaO (Reachem) и SiO<sub>2</sub> (Sigma-Aldrich). Применяли образцы CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамики с разным содержанием диоксида кремния (2, 3, 4, 4,5 и 6 мол. %). Для сравнения использовали образцы CaO-ATZ с нулевым содержанием диоксида кремния SiO<sub>2</sub>. Диспергирование подготовленных смесей порошков в дистиллированной воде, помол в планетарной мельнице *Pulverisette* (Fritsch), сушку смеси, формовку образцов в виде цилиндров диаметром 10 мм и толщиной 2 мм, а также их спекание проводили в полном соответствии с режимами, описанными в [19].

Контроль относительной плотности  $\rho$  образцов осуществляли методом Архимеда. Информацию о фазовом составе получали с использованием рентгеновского дифрактометра *D2 Phaser* (Bruker AXS). Визуализацию микроструктуры для анализа размеров кристаллитов ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выполняли на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения *Merlin* (Carl Zeiss). Все изготовленные образцы имели относительную плотность  $\rho$  не менее 95 %. Относительная доля тетрагональной фазы диоксида циркония не менее 93 %. Размеры кристаллитов ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не превышали 100 и 250 нм соответственно.

Для деформации одноосным сжатием образцы вырезали в виде параллелепипедов площадью поперечного сечения 2 × 2 мм. После распили-

ки образцы подвергали дополнительной термической обработке (часовой отжиг при температуре  $T_2 = 1200$  °С) для релаксации остаточных механических напряжений. Диаграммы нагружения регистрировали с использованием напольной двухколонной сервогидравлической испытательной машины *MTS 870 Landmark* (MTS). Машина работала в жестком режиме со скоростью деформации 1 мкм/с.

**Результаты.** Диаграммы деформации (одноосное сжатие при комнатной температуре) исследуемых образцов CaO-ATZ (бескремниевая керамика) и CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub> с различным содержанием диоксида кремния (2, 3, 4, 4,5 и 6 мол. %) приведены на рис. 1. При деформации CaO-ATZ-керамики зарегистрированы  $\sigma$ - $\varepsilon$ -диаграммы, описываемые линейной функцией, т. е. характерные для хрупких материалов (см. рис. 1, кривая 1).

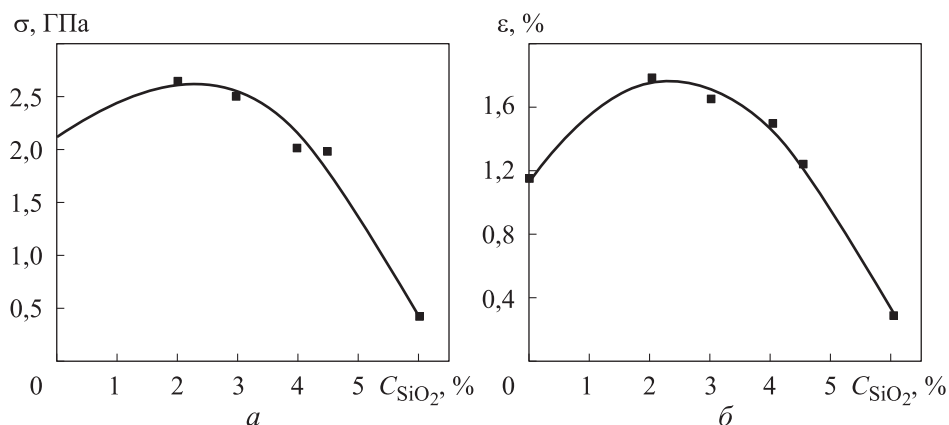


**Рис. 1.** Характерные  $\sigma$ - $\varepsilon$ -диаграммы, зарегистрированные в процессе одноосного сжатия при комнатной температуре CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамики с содержанием SiO<sub>2</sub> 0 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 4,5 (5) и 6 мол. % (6)

Добавление SiO<sub>2</sub> к CaO-ATZ-керамике приводит к проявлению у нее признаков пластичности. На  $\sigma$ - $\varepsilon$ -диаграмме появляется полка текучести (см. рис. 1, кривые 2–5). Наиболее отчетливо стадия текучести проявляется при деформации образцов CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамики, содержащих 4 мол. % диоксида кремния (см. рис. 1, кривая 4). При увеличении концентрации диоксида кремния до 6 мол. % наблюдается резкое охрупчивание. Это связано с тем, что содержание тетрагональной фазы в образцах с концентрацией SiO<sub>2</sub> 6 мол. % резко снижается и составляет не более 20 % [18].

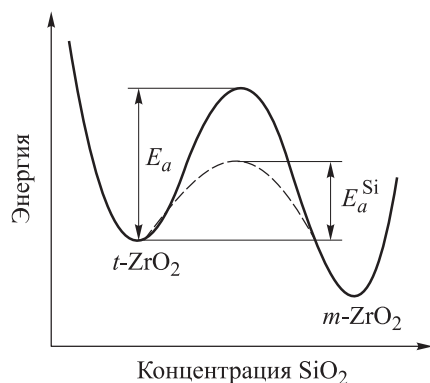
Зависимости предела прочности на сжатие и предельной деформации от содержания SiO<sub>2</sub> в CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамике показаны на рис. 2. При добавлении диоксида кремния (2...3 мол. %) увеличиваются значения предела прочности и предельной деформации. Наиболее высокие значения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  достигаются при добавлении 2 мол. % SiO<sub>2</sub>, а наиболее выраженная стадия текучести — при 4 мол. % SiO<sub>2</sub>. Кроме того, при концентрации

диоксида кремния 4...5 мол. % ранее обнаружено высокое соотношение твердость/трещиностойкость [19]. Следует отметить, что использование оксида кальция в качестве стабилизатора тетрагональной фазы диоксида циркония обеспечивает сравнительно высокую стойкость CaO-ATZ- и CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамик к низкотемпературной деградации [9].



**Рис. 2.** Зависимости предела прочности на сжатие (а) и предельной деформации (б) от концентрации SiO<sub>2</sub> в CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамике

**Обсуждение полученных результатов.** Переходя к обсуждению полученных результатов, отметим, что авторам неизвестны упоминания в литературе о массопереносе в процессе деформации циркониевой керамики при комнатной температуре за счет дислокационной подвижности или зернограничного проскальзывания. В связи с этим наблюдаемую неупругую деформацию при одноосном сжатии (по аналогии с [6, 17]) следует связывать с механоиндуцированным тетрагонально-моноклинным фазовым переходом. В этом случае повышение трансформируемости тетрагональной фазы обеспечивается введением в состав ATZ-керамики диоксида кремния, что согласуется с полученными ранее данными [20]. Схематично на рис. 3 показаны энергетические переходы из метастабильной тетрагональной фазы  $t\text{-ZrO}_2$  в стабильную моноклинную фазу  $m\text{-ZrO}_2$ . Согласно предложенной схеме, добавление SiO<sub>2</sub> к CaO-ATZ-керамике вызывает уменьшение энергетического барьера для превращения  $t \rightarrow m$  от  $E_a$  до  $E_a^{Si}$  (см. рис. 3). Превышение критического значения концентрации SiO<sub>2</sub> в CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-керамике (4,5 мол. %) приводит к возможности самопроизвольного (при отсутствии механических нагрузок) превращения  $t \rightarrow m$ . Соотношение тетрагональной и моноклинной фаз изменяется



**Рис. 3.** Энергетический переход диоксида циркония из тетрагональной фазы в моноклинную

в пользу последней, что вызывает резкое охрупчивание (см. рис. 1, 2) и снижение твердости и вязкости разрушения [18, 19]. Детализация предложенного механизма, т. е. установление

причин уменьшения энергетического порога для превращения  $t \rightarrow m$  при добавлении  $\text{SiO}_2$  к CaO-ATZ-керамике, будет являться предметом ближайших исследований.

**Заключение.** Обнаружено проявление пластичности при добавлении  $\text{SiO}_2$  к CaO-ATZ-керамике (наиболее выраженная стадия текучести наблюдается при концентрации  $\text{SiO}_2$  4 мол. %). Наибольшие значения предела прочности на сжатие и предельной деформации CaO-ATZ+ $\text{SiO}_2$ -керамики имеют место при содержании  $\text{SiO}_2$  2 мол. %. Наблюдаемая пластичность обусловлена снижением энергетического барьера для превращений  $t\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$  и, как следствие, повышением механоиндуцированной ( $t \rightarrow m$ )-трансформируемости. Представленные результаты в совокупности с полученными ранее данными о повышении стойкости ATZ-керамики к низкотемпературной деградации при использовании в качестве стабилизатора CaO свидетельствуют о перспективах применения CaO-ATZ+ $\text{SiO}_2$ -керамики для изготовления изделий, требующих запаса пластичности и подверженных воздействию влаги в процессе эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Evans A. Perspective on the development of high-toughness ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, vol. 73, iss. 2, pp. 187–206. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06493.x>
- [2] Ghaemi M., Reichert S., Krupa A., et al. Zirconia ceramics with additions of alumina for advanced tribological and biomedical applications. *Ceram. Int.*, 2017, vol. 43, iss. 13, pp. 9746–9752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.150>
- [3] Garvie R., Hannink R., Pascoe R. Ceramic steel? *Nature*, 1975, vol. 258, pp. 703–704. DOI: <https://doi.org/10.1038/258703a0>

- [4] Zhang F., Lin L., Wang E. Effect of micro-alumina content on mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/3\text{Y-TZP}$  composites. *Ceram. Int.*, 2015, vol. 41, iss. 9, part B, pp. 12417–12425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.081>
- [5] Roy S., Gibmeier J., Schell K., et al. Internal load transfer in an interpenetrating metal/ceramic composite material studied using energy dispersive synchrotron X-ray diffraction. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2019, vol. 753, pp. 247–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.049>
- [6] Chevalier J., Liens A., Reveron H., et al. Forty years after the promise of “ceramic steel?": zirconia-based composites with a metal-like mechanical behavior. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2020, vol. 103, iss. 3, pp. 1482–1513. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.16903>
- [7] Kobayashi K., Kuwajima H., Masaki T. Phase change and mechanical properties of  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  solid electrolyte after ageing. *Solid State Ion.*, 1981, vol. 3-4, pp. 489–493. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(81\)90138-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(81)90138-7)
- [8] Turon-Vinas M., Zhang F., Vleugels J., et al. Effect of calcia co-doping on ceria-stabilized zirconia. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, vol. 38, no. 6, pp. 2621–2631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.053>
- [9] Жигачев А.О., Головин Ю.И. Наноструктурная циркониевая керамика на основе отечественного сырья — бадделеита. *Российские нанотехнологии*, 2017, т. 12, № 7-8, с. 71–79.
- [10] Michálek M., Sedláček J., Parchoviansky M., et al. Mechanical properties and electrical conductivity of alumina/MWCNT and alumina/zirconia/MWCNT composites. *Ceram. Int.*, 2014, vol. 40, iss. 1, part B, pp. 1289–1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.07.008>
- [11] Kondoh J., Shiota H., Kawachi K., et al. Yttria concentration dependence of tensile strength in yttria-stabilized zirconia. *J. Alloys Compd.*, 2004, vol. 365, iss. 1-2, pp. 253–258. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00640-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00640-6)
- [12] Ushakov I.V., Feodorov V.A., Permyakova I.J. Determination of plasticity of thermally treated metallic glass by U-method and microindentation. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 5127, pp. 246–251. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.517988>
- [13] Fedorov V.A., Ushakov I.V., Permyakova I.E. Mechanical properties and crystallization of an annealed cobalt-based amorphous alloy. *Russ. Metall.*, 2004, vol. 3, pp. 293–297.
- [14] Федоров В.А., Ушаков И.В. Влияние отжига на изменение характера деформирования и разрушения металлического стекла при локальном нагружении. *ЖТФ*, 2001, т. 71, № 6, с. 28–31.
- [15] Shinkin V.N. Simple analytical dependence of elastic modulus on high temperatures for some steels and alloys. *CIS Iron and Steel Review*, 2018, vol. 15 pp. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.17580/cisisr.2018.01.07>
- [16] Головин Ю.И., Моргунов Р.В., Иванов В.Е. и др. Радиочастотные спектры парамагнитного резонанса, детектируемые по смещению дислокаций в монокристаллах NaCl. *Физика твердого тела*, 1999, т. 41, № 10, с. 1778–1784.

[17] Liens A., Swain M., Reveron H., et al. Development of transformation bands in ceria-stabilized-zirconia based composites during bending at room temperature. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2021, vol. 41, iss. 1, pp. 691–705.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.062>

[18] Дмитриевский А.А., Жигачева Д.Г., Ефремова Н.Ю. и др. Влияние примеси SiO<sub>2</sub> на трансформируемость тетрагональной фазы циркониевой керамики, армированной частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Известия Юго-западного государственного университета. Сер. Техника и технологии*, 2021, т. 11, № 1, с. 47–60.

[19] Dmitrievskii A.A., Zhigachev A.O., Zhigacheva D.G., et al. The influence of silicon dioxide on the stability of the phase composition and mechanical properties of alumina-toughened zirconia-based ceramics. *Tech. Phys.*, 2020, vol. 65, no. 12, pp. 2016–2025.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784220120075>

[20] Dmitrievskiy A.A., Zhigacheva D.G., Efremova N.Yu., et al. Phase composition stability of nanostructured composite ceramics based on CaO–ZrO<sub>2</sub> under hydrothermal impact. *Nanotechnol. Russia*, 2019, vol. 14, no. 3-4, pp. 125–131.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995078019020058>

**Овчинников Петр Николаевич** — аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики Института математики, физики и информационных технологий ТГУ им. Г.Р. Державина (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33).

**Ефремова Надежда Юрьевна** — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики Института математики, физики и информационных технологий ТГУ им. Г.Р. Державина (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33).

**Жигачева Дарья Геннадиевна** — канд. физ.-мат. наук, инженер центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ им. Г.Р. Державина (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33).

**Васюков Владимир Михайлович** — заместитель директора испытательного центра ТГУ им. Г.Р. Державина (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33).

**Родаев Вячеслав Валерьевич** — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» ТГУ им. Г.Р. Державина (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33).

**Дмитриевский Александр Александрович** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики Института математики, физики и информационных технологий ТГУ им. Г.Р. Державина (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33).



**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Овчинников П.Н., Ефремова Н.Ю., Жигачева Д.Г. и др. Пластификация циркониевой керамики, упрочненной оксидом алюминия, при добавлении диоксида кремния. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 1 (106), с. 117–128. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-117-128>

**PLASTICIZATION OF ALUMINA TOUGHENED ZIRCONIA CERAMICS WITH THE SILICA ADDITION**

**P.N. Ovchinnikov**

**N.Yu. Efremova**

**D.G. Zhigacheva**

**V.M. Vasyukov**

**V.V. Rodaev**

**A.A. Dmitrievskiy**

[ovchinnikov.pyotr@mail.ru](mailto:ovchinnikov.pyotr@mail.ru)

[netimfi@gmail.com](mailto:netimfi@gmail.com)

[dashadansec@mail.ru](mailto:dashadansec@mail.ru)

[space-1985@mail.ru](mailto:space-1985@mail.ru)

[rodaev1980@mail.ru](mailto:rodaev1980@mail.ru)

[aadmitr@yandex.ru](mailto:aadmitr@yandex.ru)

**Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation**

---

**Abstract**

The purpose of this work is to study features of deformation at the room temperature by the method of uniaxial compression of alumina toughened zirconia ceramics (stabilized with calcium oxide) with different content of the silicon dioxide (CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>). It was found that SiO<sub>2</sub> addition to the CaO-ATZ-ceramic ensured manifestation of the signs of plasticity at the room temperature, i.e., yield stage in the loading diagrams. The most pronounced plasticization was manifested at the silicon dioxide content of 4 mol. %. In this case, plastic deformation (calculated as the difference between deformations corresponding to the tensile strength and conditional yield strength) reached the 0.79 % value. In addition, introduction of the SiO<sub>2</sub> additive (2 mol. % concentration) caused an increase in the ultimate compressive strength to the value of 2.66 GPa and ultimate strain to the value of 1.79 %. It was shown that exceeding the threshold value of the SiO<sub>2</sub> concentration (by more than 4.5 mol. %) caused a sharp embrittlement of the CaO-ATZ+SiO<sub>2</sub>-ceramics. Discovered ceramics plasticity at the room temperature is explained by an increase in the tetragonal phase transformability of zirconium dioxide, which enhances the role of the transformation toughening mechanism.

**Keywords**

*Zirconium ceramics, strength properties, plastic deformation, phase transformations*

Plasticity margin of the composite ceramics based on the zirconium dioxide was achieved at the room temperature and provides a prospect for expanding the area of its practical applications

Received 15.06.2022

Accepted 29.06.2022

© Author(s), 2023

*The results were obtained using equipment of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of the Derzhavin Tambov State University. The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-29-00119, <https://rscf.ru/project/22-29-00119>) and by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the Project under Agreement no. 2296.61321X0037)*

## REFERENCES

- [1] Evans A. Perspective on the development of high-toughness ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, vol. 73, iss. 2, pp. 187–206.  
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06493.x>
- [2] Ghaemi M., Reichert S., Krupa A., et al. Zirconia ceramics with additions of alumina for advanced tribological and biomedical applications. *Ceram. Int.*, 2017, vol. 43, iss. 13, pp. 9746–9752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.150>
- [3] Garvie R., Hannink R., Pascoe R. Ceramic steel? *Nature*, 1975, vol. 258, pp. 703–704. DOI: <https://doi.org/10.1038/258703a0>
- [4] Zhang F., Lin L., Wang E. Effect of micro-alumina content on mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/3Y-TZP composites. *Ceram. Int.*, 2015, vol. 41, iss. 9, part B, pp. 12417–12425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.081>
- [5] Roy S., Gibmeier J., Schell K., et al. Internal load transfer in an interpenetrating metal/ceramic composite material studied using energy dispersive synchrotron X-ray diffraction. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2019, vol. 753, pp. 247–252.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.049>
- [6] Chevalier J., Liens A., Reveron H., et al. Forty years after the promise of “ceramic steel?": zirconia-based composites with a metal-like mechanical behavior. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2020, vol. 103, iss. 3, pp. 1482–1513. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.16903>
- [7] Kobayashi K., Kuwajima H., Masaki T. Phase change and mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solid electrolyte after ageing. *Solid State Ion.*, 1981, vol. 3-4, pp. 489–493. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(81\)90138-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(81)90138-7)
- [8] Turon-Vinas M., Zhang F., Vleugels J., et al. Effect of calcia co-doping on ceria-stabilized zirconia. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, vol. 38, no. 6, pp. 2621–2631.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.053>
- [9] Zhigachev A.O., Golovin Yu.I. Nanostructured zirconia ceramic based on baddeleyite domestic raw. *Nanotechnol. Russia*, 2017, vol. 12, no. 7-8, pp. 400–408.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995078017040176>
- [10] Michálek M., Sedláček J., Parchoviansky M., et al. Mechanical properties and electrical conductivity of alumina/MWCNT and alumina/zirconia/MWCNT composites. *Ceram. Int.*, 2014, vol. 40, no. 1, part B, pp. 1289–1295.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.07.008>

- [11] Kondoh J., Shiota H., Kawachi K., et al. Yttria concentration dependence of tensile strength in yttria-stabilized zirconia. *J. Alloys Compd.*, 2004, vol. 365, iss. 1-2, pp. 253–258. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00640-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00640-6)
- [12] Ushakov I.V., Feodorov V.A., Permyakova I.J. Determination of plasticity of thermally treated metallic glass by U-method and microindentation. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 5127, pp. 246–251. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.517988>
- [13] Fedorov V.A., Ushakov I.V., Permyakova I.E. Mechanical properties and crystallization of an annealed cobalt-based amorphous alloy. *Russ. Metall.*, 2004, vol. 3, pp. 293–297.
- [14] Fedorov V.A., Ushakov I.V. Effect of annealing on the deformation and fracture of metallic glass under local loading. *Tech. Phys.*, 2001, vol. 46, no. 6, pp. 673–676. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1379632>
- [15] Shinkin V.N. Simple analytical dependence of elastic modulus on high temperatures for some steels and alloys. *CIS Iron and Steel Review*, 2018, vol. 15 pp. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.17580/cisisr.2018.01.07>
- [16] Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Ivanov V.E., et al. Radio-frequency paramagnetic resonance spectra, detected from dislocation displacement in NaCl single crystals. *Phys. Solid State*, 1999, vol. 41, no. 10, pp. 1631–1637. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1131060>
- [17] Liens A., Swain M., Reveron H., et al. Development of transformation bands in ceria-stabilized-zirconia based composites during bending at room temperature. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2021, vol. 41, iss. 1, pp. 691–705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.062>
- [18] Dmitrievskiy A.A., Zhigacheva D.G., Efremova N.Yu., et al. Influence of SiO<sub>2</sub> impurity on transformability of tetragonal phase of zirconia toughened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii* [Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 47–60 (in Russ.)
- [19] Dmitrievskii A.A., Zhigachev A.O., Zhigacheva D.G., et al. The influence of silicon dioxide on the stability of the phase composition and mechanical properties of alumina-toughened zirconia-based ceramics. *Tech. Phys.*, 2020, vol. 65, no. 12, pp. 2016–2025. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784220120075>
- [20] Dmitrievskiy A.A., Zhigacheva D.G., Efremova N.Yu., et al. Phase composition stability of nanostructured composite ceramics based on Ca–ZrO<sub>2</sub> under hydrothermal impact. *Nanotechnol. Russia*, 2019, vol. 14, no. 3-4, pp. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995078019020058>

**Ovchinnikov P.N.** — Post-Graduate Student, Department of Theoretical and Experimental Physics, Institute of Mathematics, Physics and Information Technology, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Efremova N.Yu.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics, Institute of Mathematics, Physics and Information Technology, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Zhigacheva D.G.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Engineer, Center for Collective Use of Scientific Equipment, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Vasyukov V.M.** — Deputy Director, Testing Center, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Rodaev V.V.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Dmitrievskiy A.A.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics, Institute of Mathematics, Physics and Information Technology, Derzhavin Tambov State University (Internatsionalnaya ul. 33, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Ovchinnikov P.N., Efremova N.Yu., Zhigacheva D.G., et al. Plasticization of alumina toughened zirconia ceramics with the silica addition. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 1 (106), pp. 117–128 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-117-128>