Тугоплавкие, керамические и композиционные материалы
Refractory, Ceramic, and Composite Materials

УДК 541.16
https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-39-47

Научная статья
Research article

Влияние оксида магния на микроструктуру и механические свойства керамики на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия

Е. Д. Кузьменко ✉, С. В. Матренин, А. Р. Насырбаев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30

✉ kuzmenko70egor@yandex.ru

Аннотация. Проведены спекание и исследование композиционных керамических материалов на основе наноструктурированных порошков $MgO–ZrO_2$. Диоксид циркония был дополнительно стабилизирован 3 мол. % оксидом иттрия. Применяемые нанопорошки предварительно обрабатывались методом механоактивации с помощью планетарной шаровой мельницы при частоте вращения размольных сосудов 10 Гц. В качестве мелющих тел использованы шары из диоксида циркония. Подготовленные порошки были спрессованы при давлении прессования 50, 100, 200 и 300 МПа. Полученные прессовки спекались в высокотемпературной печи при температуре 1700 °С. На подготовленной полированной поверхности спеченных образцов проведены микроструктурные исследования методом растровой электронной микроскопии. Выполнено EDX-картирование для выявления распределения элементов, установлено наличие двух фаз во всех изученных образцах. Для оценки эффективности влияния стабилизирующих добавок на полиморфное превращение диоксида циркония осуществлен рентгенофазовый анализ. В ходе исследования определены пористость материалов и ее зависимость от давления прессования и содержания оксида магния. При проведении индентирования на приборе «NanoIndenter G200» изучены механические свойства образцов – твердость по Мартенсу и модуль упругости, а в ходе Scratch-тестирования на данном оборудовании – их предел прочности на изгиб. По методу индентирования с использованием зависимости Маршала–Эванса определена трещиностойкость образцов. В ходе исследования установлено влияние добавок оксида магния на физико-механические свойства композитной керамики $MgO–ZrO_2$.

Ключевые слова: диоксид циркония, оксид магния, наноструктурированные порошки, активированное спекание, керамика, наноиндентирование, EDX-картирование

Благодарности: Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского политехнического университета при поддержке проекта Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Для цитирования: Кузьменко Е.Д., Матренин С.В., Насырбаев А.Р. Влияние оксида магния на микроструктуру и механические свойства керамики на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(3):39–47. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-39-47

© 2025 г. Е. Д. Кузьменко, С. В. Матренин, А. Р. Насырбаев

Effect of magnesium oxide on the microstructure and mechanical properties of yttria-stabilized zirconia-based ceramics

E. D. Kuzmenko ✉, S. V. Matrenin, A. R. Nassyrbayev

National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Prosp., Tomsk 634050, Russia

✉ kuzmenko70egor@yandex.ru

Abstract. In the present work, sintering and investigation of composite ceramic materials based on nanostructured MgO–ZrO_2 powders were carried out. Zirconium dioxide was additionally stabilized with 3 mol. % yttrium oxide. The nanopowders were pre-treated by mechanical activation using a planetary ball mill at a rotation frequency of 10 Hz. Zirconium dioxide balls were used as the grinding media. The prepared powders were compacted at pressing pressures of 50, 100, 200, and 300 MPa. The compacts were sintered in a high-temperature furnace at 1700 °C. Microstructural studies were performed on the polished surfaces of the sintered samples using scanning electron microscopy (SEM). EDX mapping was conducted to determine the elemental distribution, confirming the presence of two phases in all samples. To evaluate the effectiveness of stabilizing additives on the polymorphic transformation of zirconium dioxide, *X*-ray diffraction (XRD) analysis was performed. The porosity of the materials and its dependence on the pressing pressure and magnesium oxide content were also assessed. Mechanical properties such as Martens hardness and elastic modulus were measured using a NanoIndenter G200, while flexural strength was evaluated by scratch testing on the same device. Fracture toughness was determined by the indentation method using the Marshall–Evans approach. The influence of magnesium oxide additives on the physical and mechanical properties of the MgO–ZrO_2 composite ceramics was established.

Keywords: zirconium dioxide, magnesium oxide, nanostructured powders, activated sintering, ceramics, nanoindentation, EDX mapping

Acknowledgements: The research was carried out using the facilities of the Shared Research Center “Nanomaterials and Nanotechnologies” of Tomsk Polytechnic University with support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-710.

For citation: Kuzmenko E.D., Matrenin S.V., Nassyrbayev A.R. Effect of magnesium oxide on the microstructure and mechanical properties of yttria-stabilized zirconia-based ceramics. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(3):39–47. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-39-47

Введение

Керамика на основе диоксида циркония получила широкое применение в различных областях науки и техники благодаря своим выдающимся свойствам. Данный материал обладает высокой трещиностойкостью [1], низким коэффициентом трения [2], значительной износостойкостью и прочностью [3]. В связи с этим керамические материалы на основе диоксида циркония широко используются в стоматологии [4], для изготовления имплантов головок тазобедренных суставов, а также режущего инструмента, тел качения подшипников, термостойких элементов и во многих других сферах.

Однако в силу присущего диоксиду циркония фазового перехода в моноклинную модификацию и происходящих в связи с этим объемных изменений материала накладывается ряд ограничений в производстве изделий из данного материала [5]. В частности, необходимо введение стабилизирующих добавок, в роли которых чаще всего выступают оксиды иттрия, кальция, церия. В результате введения стабилизаторов становится возможным предотвратить фазовый переход ввиду создания твердого раствора замещения на основе диоксида циркония и введенной добавки. При этом ионный радиус элементов замещения близок к радиусу иона (Zr^{4+}), однако превышает его [6].

Предотвращение фазового перехода может быть выполнено и другими методами, когда компоненты не образуют твердых растворов. Так, существует способ стабилизации при создании композиционного материала на основе Al_2O_3–ZrO_2. Благодаря высокому модулю Юнга оксида алюминия и меньшему тепловому расширению данного материала, после спекания образуется жесткая матрица, в которой равномерно распределены частицы диоксида циркония, находящиеся в поле сжимающих напряжений. В результате диоксид циркония не претерпевает полиморфного превращения и из-за композиционной структуры становится возможным достижение улучшенных механических свойств [7]. В качестве матрицы также могут использоваться оксид магния, нитрид кремния и другие высокомодульные включения [8].

Существует возможность стабилизации диоксида циркония путем воздействия сразу нескольких факторов. Однако создание сложных оксидных систем, состоящих из трех или более компонентов оксидных керамик, не изучено в достаточной степени. Так, в работе [9] оценено влияние малых добавок (до 2 мас. %) MgO на керамику ZTA–CeO_2. Было установлено, что взаимосвязь добавки и получаемых механических свойств в данной керамике нелинейна, и они достигают наиболее оптимальных показателей при введении 0,5 мас. % MgO, что объясняется авторами процессом получения двух новых фаз – $MgAl_{11}CeO_{19}$ и $MgAl_2O_4$. В публикации [10] отмечалось, что при увеличении содержания оксида магния до 8 мол. % трещиностойкость возрастает, а твердость снижается. В работе [11] при введении к керамике Mg–PSZ оксида иттрия наблюдалось качественное повышение твердости материала с незначительным уменьшением трещиностойкости. Проведенные исследования свидетельствуют о значительной перспективе в получении композитных керамик на основе диоксида циркония с добавками оксидов магния и иттрия.

Целью настоящей работы являлось определение влияния содержания оксида магния на микроструктуру и механические свойства керамики сложной оксидной системы: MgO–ZrO_2–Y_2O_3.

Методика исследований

В проведенном исследовании были применены наноразмерные порошки диоксида циркония марки УДПО ВТУ 4-25-90, полученные методом плазмохимического синтеза, средний размер частиц которых составлял 500 нм, и микронные промышленные порошки оксида магния марки МРТУ 6-09-3391-67 с размером частиц менее 40 мкм. Чистота порошков составляла 99 %.

В порошок диоксида циркония вводилась добавка 3 мол. % оксида иттрия. На основе данных порошков были подготовлены смеси следующих составов, мол. %: 2MgO–98ZrO_2; 4MgO–96ZrO_2; 8MgO–92ZrO_2; 16MgO–84ZrO_2. Соотношения компонентов в массовых и мольных долях указаны в таблице.

Соотношение компонентов в порошковых смесях

Composition of powder mixtures

Состав смеси	
мол. %	мас. %
2MgO–98ZrO_2	0,65MgO–99,35ZrO_2
4MgO–96ZrO_2	1,33MgO–98,67ZrO_2
8MgO–92ZrO_2	2,75MgO–97,25ZrO_2
16MgO–84ZrO_2	5,83MgO–94,17ZrO_2

Исследуемые порошки были предварительно механоактивированы. Механоактивация проводилась в планетарной шаровой мельнице «Активатор-2SL» (машиностроительный завод «Активатор», г. Новосибирск) по следующему режиму: частота вращения размольных сосудов – 10 Гц, время обработки – 10 мин, отношение массы размольных шаров из диоксида циркония к массе порошков – 3:1.

Подготовленные смеси были сформованы с применением пластификатора – карбоксиметилцеллюлозы – при давлениях 50, 100, 200 и 300 МПа по методу одноосного прессования. Далее проводилось спекание образцов в высокотемпературной печи при температуре 1700 °C с выдержкой при заданной температуре 1 ч. Плотности исследуемых образцов были определены методом гидростатического взвешивания. Получение композиционной структуры с возможными новыми твердыми растворами осложняет определение теоретической плотности, поэтому пористость материала оценивали на основании микрофотографий поверхности образцов, полученных при помощи растровой электронной микроскопии при малых увеличениях (200×), по схеме, представленной в работах [12; 13].

С использованием растрового электронного микроскопа «Zeiss EVO 50» (Carl Zeiss, Германия) были выполнены исследования поверхности образцов, а также их элементный анализ – EDX-картирование.

Фазовый состав материалов был изучен методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с Cu$K_{\alpha 1}$-излучением (λ = 1,5406 Å) со ступенчатым сканированием в диапазоне $2\theta = 10 \div 90°$. Идентификацию дифракционных пиков проводили с помощью программы «Crystallographica Search-Match» и базы структурных данных PDF4+. Рентгеноструктурный анализ осуществляли с использованием программы «PowderCell 2.4» и базы структурных данных PDF4+.

Механические свойства исследуемых образцов изучали на приборе «NanoIndenter G200» (KLA-Tencor, США), оснащенном алмазной пирамидой Берковича, при нагрузке на индентор 500 мН. Были определены твердости образцов по Мартенсу, модули упругости при анализе кривых нагружения. По методу Scratch-Test были установлены пределы прочности при индентировании образцов. Данный метод основан на нанесении царапины на исследуемую поверхность образца с линейно возрастающей нагрузкой до 10 мН и последующем измерении глубины трещины и ее ширины. Методика наноиндентирования подробно описана в работах [14; 15]. С применением твердомера Виккерса ПМТ-3 (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) была определена трещиностойкость исследуемых образцов по методу индентирования [16]. Наведение трещин осуществлялось при усилии 5 Н.

Результаты и их обсуждение

После проведения спекания по заданному режиму были получены образцы высокой плотности (рис. 1). Среди исследуемых составов наибольшей плотностью отличались образцы (мол. %) 8MgO–92ZrO_2. Было установлено, что зависимость относительной плотности композиционных керамик MgO–ZrO_2 от состава нелинейна. Так, при всех исследуемых давлениях прессования относительные плотности исследуемых образцов убывали в следующем порядке (мол. %): 8MgO–92ZrO_2, 4MgO–96ZrO_2, 16MgO–84ZrO_2, 2MgO–98ZrO_2, что подтверждается в работах [17; 18]. Было установлено [17], что при увеличении продолжительности времени спекания керамики состава 8MgO–92ZrO_2 плотность продолжает возрастать вплоть до обработки в течение 20 ч. В работе [18] отмечено, что пористость композитов на основе MgO–ZrO_2 изменяется в зависимости от наличия оксида магния, однако при различных диапазонах температур характер зависимости различен и наблюдается как уменьшение, так и увеличение пористости материала, при этом зависимость линейна только в ряде температурных интервалов. Исследование [18] проводилось при бóльших температурах, по сравнению с настоящей работой, и была отмечена повышенная пористость в диапазоне от 24 до 32 %. Это свидетельствует об эффективности примененного режима механоактивации и необходимости его дальнейшего использования при работе с материалами данного состава.

При использовании EDX-картирования, с целью установления элементного анализа керамических образцов, спрессованных при давлении прессования 300 МПа, были получены снимки шлифа полированной поверхности. На рис. 2 представлены распределение элементов и изображения микроструктуры для состава 2MgO–98ZrO_2.

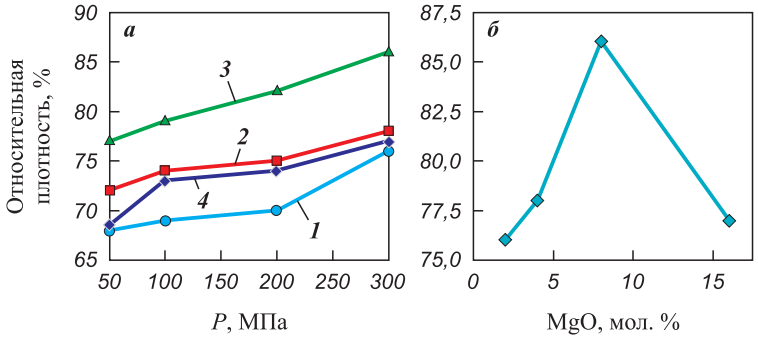

Рис. 1. Зависимость относительной плотности спеченных образцов от давления прессования (***а***) и содержания оксида магния для образцов, полученных при P = 300 МПа (***б***)
Образцы, мол. %: ***1*** – 2MgO–98ZrO_2, ***2*** – 4MgO–96ZrO_2, ***3*** – 8MgO–92ZrO_2, ***4*** – 16MgO–84ZrO_2

Fig. 1. Dependence of the relative density of sintered samples on pressing pressure (***а***) and on magnesium oxide content for samples compacted at P = 300 MPa (***б***)
Samples, mol. %: ***1*** – 2MgO–98ZrO_2, ***2*** – 4MgO–96ZrO_2, ***3*** – 8MgO–92ZrO_2, ***4*** – 16MgO–84ZrO_2

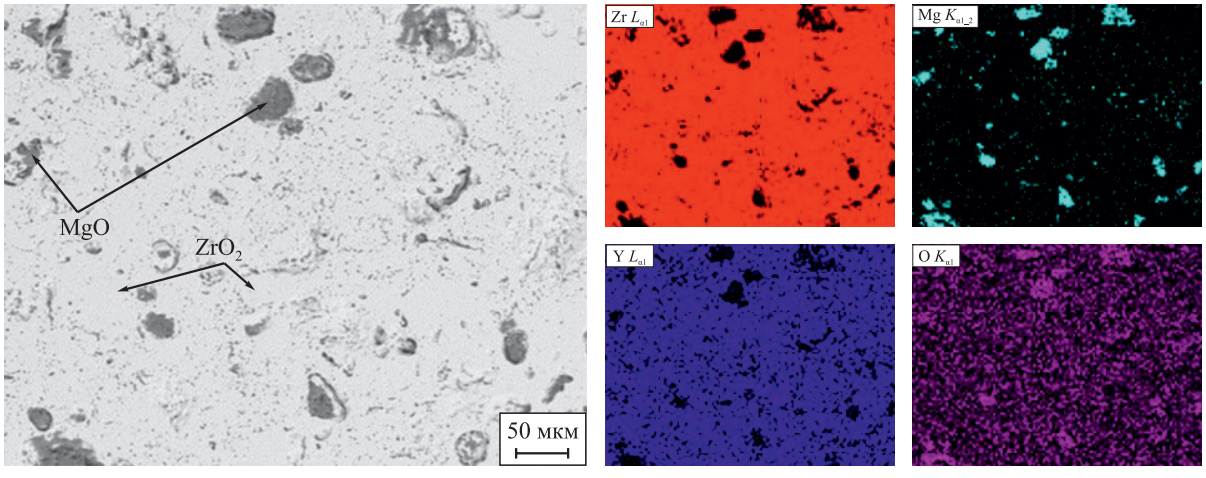

Рис. 2. Элементный анализ спеченного образца состава 2MgO–98ZrO_2

Fig. 2. Elemental analysis of a sintered sample with the composition 2MgO–98ZrO_2

В результате проведенного EDX-картирования для образцов на основе $MgO–ZrO_2$ установлено наличие двух отдельных фаз: MgO и ZrO_2, подобная ситуация наблюдается в работе [19]. Однако, согласно работам [10; 11; 20], должно произойти образование твердого раствора на основе ZrO_2–MgO. Полученная в работе композиционная двухфазная структура показывает, что взаимодействия между MgO и ZrO_2 при спекании не происходит. По результатам EDX-картирования, магний не входит в кристаллическую структуру ZrO_2 и не образует твердый раствор на основе ZrO_2–MgO, что связано со стабилизирующим воздействием Y_2O_3.

Для выявления влияния стабилизирующих добавок в ходе работы был проведен рентгенофазовый анализ (рис. 3). Было установлено, что в исследуемых образцах диоксид циркония находится в кубической и моноклинной модификациях, что свидетельствует о неполном процессе стабилизации диоксида циркония [10; 21; 22]. По данным работы [23], увеличение температуры спекания должно оказать положительный эффект на процесс стабилизации, что является актуальным направлением для дальнейшего исследования.

В результате механических испытаний было определено, что твердости исследуемых образцов находятся в широком диапазоне значений. Среди этих образцов максимальной твердостью по Мартенсу (8,65 ГПа) обладала керамика состава $16MgO–84ZrO_2$, полученная при давлении прессования $P = 300$ МПа. Именно при таком давлении все образцы имели наибольшую твердость. В ходе работы наблюдалось увеличение показателей твердости от приложенного давления прессования, но для композиции состава $4MgO–96ZrO_2$ были обнаружены значения, отклоняющиеся от положительной зависимости.

Для керамических композиционных материалов $MgO–ZrO_2$ было установлено, что при $P = 50$ МПа твердости исследуемых образцов находятся на одном уровне, независимо от состава, и составляют порядка 5 ГПа. При повышении давления прессования твердость возрастает, однако явный вклад оксида магния в увеличение твердости проявляется при $P > 200$ МПа, что связано с уменьшением вклада пористости в достигаемую твердость материала, поэтому определяли зависимость твердости от фазового состава [24]. При давлении прессования ≥200 МПа наблюдается линейно возрастающая зависимость твердости от содержания оксида магния

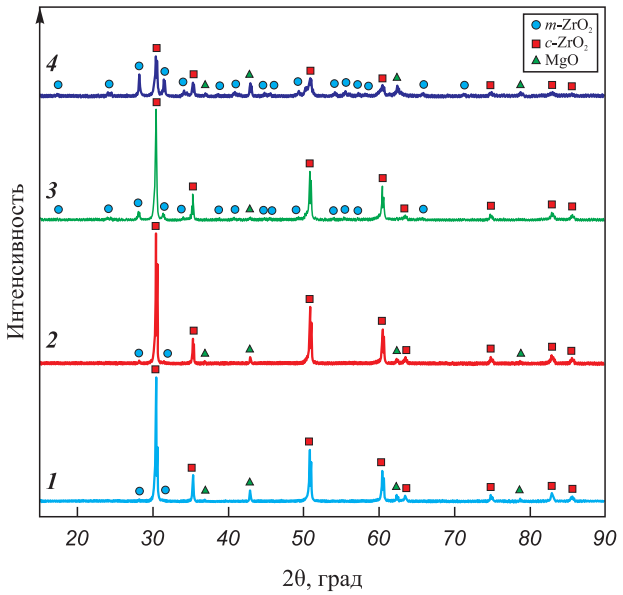

Рис. 3. Рентгенофазовый анализ
Образцы, мол. %: ***1*** – $2MgO–98ZrO_2$, ***2*** – $4MgO–96ZrO_2$, ***3*** – $8MgO–92ZrO_2$, ***4*** – $16MgO–84ZrO_2$

Fig. 3. *X*-ray diffraction (XRD) analysis
Samples, mol. %: ***1*** – $2MgO–98ZrO_2$, ***2*** – $4MgO–96ZrO_2$, ***3*** – $8MgO–92ZrO_2$, ***4*** – $16MgO–84ZrO_2$

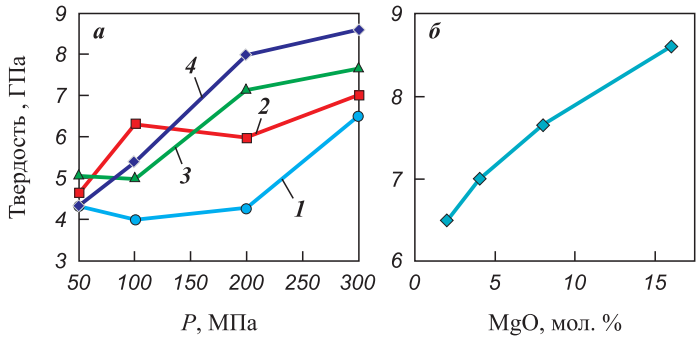

Рис. 4. Зависимость твердости по Мартенсу спеченных образцов от давления прессования (***а***) и от содержания оксида магния для образцов, полученных при $P = 300$ МПа (***б***)
Образцы, мол. %: ***1*** – $2MgO–98ZrO_2$, ***2*** – $4MgO–96ZrO_2$, ***3*** – $8MgO–92ZrO_2$, ***4*** – $16MgO–84ZrO_2$

Fig. 4. Dependence of Martens hardness of sintered samples on pressing pressure (***a***) and magnesium oxide content for samples produced at P =300 MPa (***б***)
Samples, mol. %: ***1*** – $2MgO–98ZrO_2$, ***2*** – $4MgO–96ZrO_2$, ***3*** – $8MgO–92ZrO_2$, ***4*** – $16MgO–84ZrO_2$

(рис. 4), которая основана на изменении кристаллохимической структуры. В работе [18] также прослеживалась схожая зависимость повышения твердости с ростом содержания MgO. Авторами [18] применены бóльшие температуры спекания (от 1570 до 1970 К), чем в настоящем исследовании, однако и при проведении нами спекания при меньшей температуре сохранялось положительное влияние оксида магния на твердость материала, что делает перспективным дальнейшее изучение данного керамического композиционного материала при пониженных температурах спекания. При этом твердости исследуемых материалов для системы $MgO–ZrO_2–Y_2O_3$, согласно [10; 11], превышают показатели твердости керамик $MgO–ZrO_2$, $Y_2O_3–ZrO_2$, MgO. Так, твердость по Виккерсу керамики $MgO–ZrO_2–Y_2O_3$ может увеличиться до 14,8 ГПа по сравнению с показателями, соответственно, 10,9, 12,0–12,5 и 10–11 ГПа, характерными для вышеуказанных материалов.

При проведении исследования модуля упругости материалов наибольшее его значение – 330,3 ГПа – было зафиксировано у керамики с составом $16MgO–84ZrO_2$ при давлении прессования 300 МПа (рис. 5). Для керамик $MgO–ZrO_2$ наблюдается отклонение значений этого показателя от ранее установленной зависимости для твердости. Так, для образцов $4MgO–96ZrO_2$ и $8MgO–92ZrO_2$ отмечена нелинейная зависимость изменения модуля упругости от прикладываемого давления, однако данный показатель практически идентичен для максимального и минимального давлений. Наибольший модуль упругости при всех прикладываемых давлениях был выявлен для состава $16MgO–84ZrO_2$. При $P = 50$ МПа установлено, что с увеличением содержания оксида магния модуль упругости возрастает, однако при дальнейшем повышении давления прессования данная зависимость нарушается и приобретает нелинейный характер, не связанный с показателями пористости. Определено, что при максимальном давлении прессования и наибольшей плотности материалов наибольшими модулями упругости обладают керамики составов: $16MgO–84ZrO_2$ и $2MgO–98ZrO_2$, а пониженными – $4MgO–96ZrO_2$ и $8MgO–92ZrO_2$, т.е. формируется параболическая зависимость модуля упругости от содержания оксида магния с минимумом при 4 мол. % MgO. В исследовании [25] приведена зависимость модуля упругости от доли оксида магния в композите $MgO–ZrO_2$ и установлено его возрастание с увеличением содержания MgO до 20 мол. %. При дальнейшем повышении содержания MgO модуль упругости снижается, но поскольку интервалы введения оксида магния были большие (порядка 20 %), то это не давало должного описания влияния оксида магния на модуль упругости в диапазоне от 0 до 20 мол. % MgO. В связи с этим проведенное исследование имеет дополнительную актуальность, раскрывая поведение модуля упругости в указанном интервале составов.

В данной работе были определены показатели прочности керамических образцов при давлении прессования 300 МПа методом скретч-тестирования, а также критические коэффициенты интенсивности напряжений (трещиностойкость) (рис. 6). Установлено, что наименьшей прочностью (467,17 МПа) обладает образец состава $2MgO–98ZrO_2$. Наблюдалось увеличение показателя прочности до значений 791,15 МПа при повышении содержания оксида магния, при этом данная зависимость имела гиперболический характер. Согласно работе [25], поведение показателя прочности, как и в случае с модулем упругости, сводится к максимальному его увеличению при введении 20 мол. % MgO и последующему снижению при превышении доли данного компонента при тех же неизменных интервалах введения оксида магния.

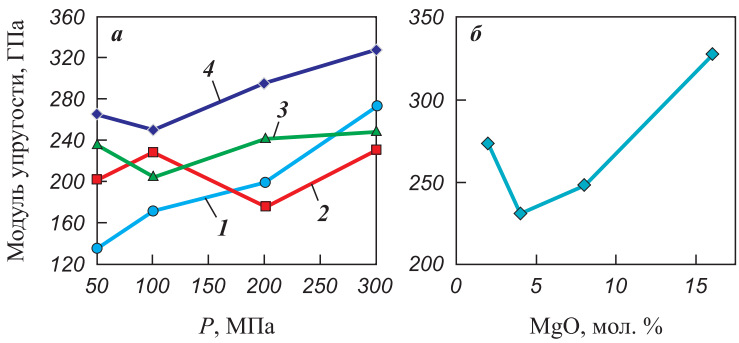

Рис. 5. Зависимость модуля упругости спеченных образцов от давления прессования (***а***) и от содержания оксида магния для образцов, полученных при $P = 300$ МПа (***б***)

Образцы, мол. %: ***1*** – $2MgO–98ZrO_2$, ***2*** – $4MgO–96ZrO_2$, ***3*** – $8MgO–92ZrO_2$, ***4*** – $16MgO–84ZrO_2$

Fig. 5. Dependence of elastic modulus of sintered samples on pressing pressure (***a***) and magnesium oxide content for samples obtained at $P = 300$ MPa (***б***)

Samples, mol. %: ***1*** – $2MgO–98ZrO_2$, ***2*** – $4MgO–96ZrO_2$, ***3*** – $8MgO–92ZrO_2$, ***4*** – $16MgO–84ZrO_2$

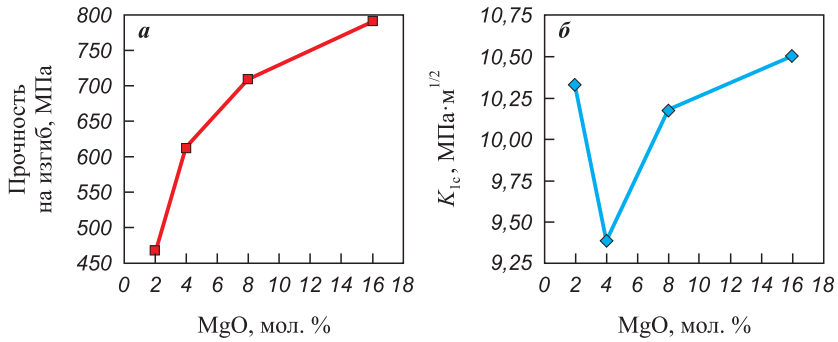

Рис. 6. Зависимость предела прочности на изгиб (***а***) и трещиностойкости (***б***) спеченных образцов от содержания оксида магния

Fig. 6. Dependence of flexural strength (***а***) and fracture toughness (***б***) of sintered samples on the magnesium oxide content

В ходе настоящего исследования установлено, что критический коэффициент интенсивности напряжений в зависимости от содержания оксида магния изменяется нелинейно, достигая наибольшего значения 10,53 МПа·м$^{1/2}$ при 16 мол. % MgO. В публикациях [9; 10] описано, что введение оксида магния в различных мольных долях повышает трещиностойкость керамики на основе диоксида циркония, однако изменение этого показателя носит нелинейный характер. Авторами [9] установлено, что введение малой добавки оксида магния – 0,5 мол. % MgO – увеличивает трещиностойкость до 9,14 МПа·м$^{1/2}$. В публикации [10] были исследованы образцы на основе диоксида циркония, стабилизированного 8 мол. % MgO. Авторами [10] было обнаружено, что при повышении температуры спекания с 1450 до 1500 °С критический коэффициент интенсивности напряжений возрастает с 7,59 до 8,5 МПа·м$^{1/2}$. В настоящей работе при поднятии температуры спекания до 1700 °С и введении дополнительной стабилизирующей добавки – оксида иттрия – для образца с содержанием 8 мол. % оксида магния наблюдалось возрастание трещиностойкости до 10,14 МПа·м$^{1/2}$, что свидетельствует об эффективности повышения температуры спекания с целью увеличения данного параметра.

Выводы

1. В результате проведенного исследования установлено, что при консолидировании смесей керамических порошков MgO–ZrO_2 при дополнительной стабилизации диоксида циркония оксидом иттрия становится возможным получение композиционной структуры. Показано, что магний не входит в кристаллическую структуру ZrO_2 и не образует твердый раствор на основе ZrO_2–MgO, что связано со стабилизирующим воздействием Y_2O_3.

2. За счет проведения механоактивации исследуемых керамических шихт при частоте вращения размольных сосудов 10 Гц в течение 10 мин пористость спеченных материалов снижается по сравнению с литературными данными.

3. Выявлено, что увеличение давления прессования до 300 МПа эффективно влияет на механические свойства материалов.

4. Среди исследуемых образцов наибольшей твердостью по Мартенсу (8,65 ГПа) обладала керамика состава 16 % MgO–84 % ZrO_2, полученная при давлении прессования 300 МПа. Увеличение содержания оксида магния оказывает положительное влияние на твердость материала, однако явный вклад MgO в увеличение твердости проявляется при $P > 200$ МПа, что связано с уменьшением вклада пористости в достигаемую твердость материала.

5. Для образца 16 % MgO–84 % ZrO_2, полученного при давлении прессования 300 МПа, был зафиксирован максимальный модуль упругости среди исследуемых материалов – 330,3 ГПа. При этом для образцов данного состава наблюдаются наибольшие показатели модуля упругости при всех применяемых давлениях прессования. Для образцов, полученных при $P = 300$ МПа, установлена параболическая зависимость модуля упругости от содержания оксида магния с минимумом при 4 мол. % MgO.

6. Установлено, что при увеличении содержания оксида магния прочность материала увеличивается, достигая 791,15 МПа при введении 16 мол. % MgO.

7. Показано, что зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений от содержания оксида магния имеет нелинейный характер и демонстрирует его наибольшее значение 10,53 МПа·м$^{1/2}$ при 16 мол. % MgO.

Список литературы / References

1. Soon G., Pingguan-Murphy B., Lai K.W., Akbar S.A. Review of zirconia-based bioceramic: Surface modification and cellular response. *Ceramics International*. 2016; 42(11):12543–12555. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.077

2. Ghaemi M.H., Reichert S., Krupa A., Sawczak M., Zykova A., Lobach K., Svitlychnyi Y. Zirconia ceramics with additions of alumina for advanced tribological and biomedical applications. *Ceramics International*. 2017; 43(13):9746–9752. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.150
3. Смирнов В.В., Смирнов С.В., Оболкина Т.О., Антонова О.С., Гольдберг М.А., Баринов С.М. Низкотемпературное жидкофазное спекание диоксида циркония: исследование фазового состава и микроструктуры. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2020;494(1);37–41. https://doi.org/10.31857/S268695352005012X

Smirnov V.V., Smirnov S.V., Obolkina T.O., Antonova O.S., Goldberg M.A., Barinov S.M. Low-temperature liquid-phase sintering of zirconium dioxide: study of phase composition and microstructure. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Science*. 2020;494(1);37–41. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S268695352005012X
4. Гольдберг М.А., Смирнов В.В., Баринов С.М. Создание новых керамических материалов на основе диоксида циркония и оксида алюминия для медицинских применений. В сб. науч. тр.: *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет*. М.: Интерконтакт Наука, 2018. С. 286–292. https://doi.org/10.30791/978-5-902063-58-20286-292
5. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000; 83(3):461–487. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x
6. Casellas D., Cumbrera F.L., Sánchez-Bajo F., Forsling W., Llanes L., Anglada M. On the transformation toughening of Y–ZrO_2 ceramics with mixed Y–TZP/PSZ microstructures. *Journal of the European Ceramic Society*. 2001;21(6):765–777. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00273-9
7. Дмитриевский А.А., Жигачев А.О., Жигачева Д.Г., Тюрин А.И. Структура и механические свойства композиционной керамики CaO–ZrO_2–Al_2O_3 при малых концентрациях корунда. *Журнал технической физики*. 2019;89(1):107–111. https://doi.org/10.21883/JTF.2019.01.46970.102-18

Dmitrievskii A.A., Zhigachev A.O., Zhigacheva D.G., Tyurin A.I. Structure and mechanical properties of the CaO–ZrO_2–Al_2O_3 ceramic composites at low corundum concentrations. *Technical Physics*. 2019;64(1):81–91. https://doi.org/10.1134/S1063784219010092
8. Aragon-Duarte M.C., Nevarez-Rascon A., Esparza-Ponce H.E., Nevarez-Rascon M.M., Talamantes R.P., Ornelas C., Hurtado-Macias A. Nanomechanical properties of zirconia-yttria and alumina zirconia-yttria biomedical ceramics, subjected to low temperature aging. *Ceramics International*. 2017;43(5):3931–3939. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.033
9. Rejab N.A., Azhar A.Z., Kian K.S., Ratnam M.M., Ahmad Z.A. Effects of MgO addition on the phase, mechanical properties, and microstructure of zirconia-toughened alumina added with CeO_2 (ZTA–CeO_2) ceramic composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;595:18–24. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.091
10. Soylemez B., Sener E., Yurdakul A., Yurdakul H. Fracture toughness enhancement of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline ceramics through magnesia-partially stabilized zirconia addition. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2020;5(4):527–534. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.09.003
11. Chieko Y., Armani P.J. Influence of Y_2O_3 addition on the microstructure and mechanical properties of Mg–PSZ ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2011; 1:556–561.
12. Che T., Mao H.R., Guo R.F., Shen P. Ultrafast synthesis and pressureless densification of multicomponent nitride and carbonitride ceramics. *Ceramics International*. 2023; 49(19):31530–31538. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.104
13. Kosyanov D.Yu., Zavjalov A.P., Vornovskikh A.A., Zakharenko A.M., Liu X., Li J. Some approaches for residual porosity estimating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1093(1):12–15. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1093/1/012015
14. Kuzmenko E.D. Investigation of physical and mechanical properties and microstructure of ceramics based on zirconium carbide and nitride. In: *Proceedings of the XII All Russian scientific conference on current issues of continuum mechanics and celestial mechanics (CICMCM 2023)* (Tomsk, Russia, 15–17 November 2023). Springer, Singapore: 2024. Vol. 412. P. 150–157. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_22
15. Матренин С.В., Мостовщиков А.В., Мировой Ю.А. Исследование структуры и физико-механических свойств керамики на основе оксинитридов алюминия и циркония. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(2):184–192. https://doi.org/10.18799/24131830/2022/2/3569

Matrenin S.V., Mostovshchikov A.V., Mirovoy Yu.A. Study of the structure and physical and mechanical properties of ceramics based on aluminum and zirconium oxynitrides. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(2):184–192. (In Russ.). https://doi.org/10.18799/24131830/2022/2/3569
16. Moradkhani A., Panahizadeh V., Hoseinpour M. Indentation fracture resistance of brittle materials using irregular cracks: a review. *Heliyon*. 2023;9(9):12. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19361
17. Ahmed Z.S., Chyad F.A. SEM-assisted thermophysical and mechanical properties of sintered MgO–ZrO_2 composite. *Energy Procedia*. 2013;36:872–880. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.100
18. Хахалкин В.В., Кульков С.Н. Влияние температуры горячего прессования на фазовый состав и параметры кристаллической структуры высокодисперсной порошковой системы ZrO_2–MgO. *Перспективные материалы*. 2010;(2):98–102.

Khakhalkin V.V., Kulkov S.N. Effect of hot pressing temperature on the phase composition and crystal structure parameters of the highly dispersed ZrO_2–MgO powder

system. *Perspektivnye Materialy*. 2010;(2):98–102. (In Russ.).
19. Song Q., Zha X., Gao M., Shi J., Ma Y. Influence of ZrO_2 on the phase composition and mechano-physical properties of MgO–ZrO_2 refractories prepared by cold isostatic pressing. *Ceramics International*. 2024;50(17):30474–30482. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.345
20. Sniezek E., Szczerba J., Stoch P., Prorok R., Jastrzebska I., Bodnar W., Burkel E. Structural properties of MgO–ZrO_2 ceramics obtained by conventional sintering, arc melting and field assisted sintering technique. *Materials & Design*. 2016;99:412–420. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.106
21. Rada S., Zhang J., Rada R., Culea E. Advanced zirconia ceramics stabilized with yttria and magnesia: Structure and Vickers microhardness. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022;134:105425. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105425
22. Abdelgawad M., El-Gamal S.M.A., Ewais E.M., Li S. Effect of magnesia rich spinel on densification and stabilization behavior of monoclinic zirconia. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2021;58:276–286. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105425
23. Jiang L., Guo S., Bian Y., Zhang M., Ding W. Effect of sintering temperature on mechanical properties of magnesia partially stabilized zirconia refractory. *Ceramics International*. 2016;42(9):10593–10598. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.136
24. Кузьменко Е.Д., Матренин С.В., Насырбаев А.Р. Физико-механические свойства керамики на основе ZrN–ZrO_2, полученной методом искрового плазменного спекания. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024; 335(7):166–173. https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4614

Kuzmenko E.D., Matrenin S.V., Nassyrbayev A.R. Physical and mechanical properties of ceramics based on ZrN–ZrO_2 obtained by spark plasma sintering method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(7):166–173. (In Russ.). https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4614
25. Ткачев Д.А., Буяков А.С. Исследование прочностных свойств пористого композита ZrO_2(MgO)–MgO при трехточечном изгибе. В сб: *Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики*. Томск: ТГУ, 2018. С. 154–158.

Сведения об авторах

Егор Дмитриевич Кузьменко – студент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)
ORCID: 0009-0006-7995-9776
E-mail: kuzmenko70egor@yandex.ru

Сергей Вениаминович Матренин – к.т.н., доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий НИТПУ
ORCID: 0000-0002-2188-8120
E-mail: msv@tpu.ru

Артур Ринатович Насырбаев – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИТПУ
ORCID: 0000-0003-4761-8863
E-mail: arn1@tpu.ru

Information about the Authors

Egor D. Kuzmenko – Student, Division for Materials Science, School of Advanced Manufacturing Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University (NRTPU)
ORCID: 0009-0006-7995-9776
E-mail: kuzmenko70egor@yandex.ru

Sergey V. Matrenin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Division for Materials Science, School of Advanced Manufacturing Technologies, NRTPU
ORCID: 0000-0002-2188-8120
E-mail: msv@tpu.ru

Artur R. Nassyrbayev – Assistant, Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, NRTPU
ORCID: 0000-0003-4761-8863
E-mail: arn1@tpu.ru

Вклад авторов

Е. Д. Кузьменко – формирование основной концепции исследования, проведение испытаний образцов, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи, формулировка выводов.
С. В. Матренин – постановка цели и задачи исследования, проведение испытаний образцов, научное руководство, корректировка текста статьи, корректировка выводов.
А. Р. Насырбаев – проведение испытаний образцов, проведение расчетов, анализ результатов исследования.

Contribution of the Authors

E. D. Kuzmenko – development of the main research concept, sample testing, analysis of research results, manuscript preparation, and formulation of conclusions.

S. V. Matrenin – definition of the research aim and objectives, sample testing, scientific supervision, manuscript revision, and refinement of conclusions.
A. R. Nassyrbayev – sample testing, performing calculations, and analysis of research results.

Статья поступила 31.01.2025 г.
Доработана 31.03.2025 г.
Принята к публикации 02.04.2025 г.

Received 31.01.2025
Revised 31.03.2025
Accepted 02.04.2025