

УДК 537.874.76:67.02
МРНТИ 55.24.99

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-286-297>

^{1,2}**Боргеков Д.Б.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-9727-0511,
e-mail: borgekov@inp.kz
^{1,2}**Шлимас Д.И.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0003-2454-7177,
e-mail: shlimas@mail.ru
^{1*}**Шакирзянов Р.И.,**
к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0001-9908-3034,
*e-mail: shakirzyanov_ri@enu.kz
^{1,2}**Гаранин Ю.А.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-0759-4329,
e-mail: jorge.r2448@gmail.com
¹**Мазных С.А.,**
ORCID ID: 0009-0008-0601-8865,
e-mail: sofiyamaznykh@gmail.com
¹**Володина Н.О.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-0109-7102,
e-mail: natalia00volodina@gmail.com
^{1,2}**Козловский А.Л.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0001-8832-7443,
e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz
^{1,2}**Здоровец М.В.,**
к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0003-2992-1375,
e-mail: mzdorovets@gmail.com

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

²Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
г. Алматы, Казахстан

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ИЗ АЛЮМИНАТА МАГНИЯ, АРМИРОВАННОГО ДИОКСИДОМ ЦИРКОНИЯ

Аннотация

Улучшение механических характеристик технических керамик является актуальной задачей современного керамического материаловедения. В частности, существует потребность в улучшении механических характеристик огнеупоров на основе шпинели $MgAl_2O_4$, поскольку данная шпинель характеризуется безупречной стойкостью к высокотемпературной коррозии. Работа посвящена изучению микроструктуры, фазового состава и механических свойств керамики $MgAl_2O_4-ZrO_2$. Экспериментальные образцы были синтезированы твердофазным методом из порошковых компактов. Для комплексного изучения микроструктуры и фазового состава использовались методы сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. Механические свойства керамических образцов изучались через измерение прочности таблеток на двухосный изгиб. Армирование алюмината магния диоксидом циркония проводилось для улучшения механических характеристик композитной керамики. Было установлено, что изменение фракции пресс-порошка может влиять на усадку, плотность и механические свойства керамических образцов $MgAl_2O_4-ZrO_2$. В частности, уменьшение фракции пресс-порошка увеличивает прочность на двухосный изгиб таблеток алюмината магния и армированного композита. Значительное улучшение механических характеристик наблюдается для композита с добавкой 40 масс. % ZrO_2 .

Ключевые слова: алюминат магния, шпинель, бадделлит, прочность на двухосный изгиб.

Введение

Современная промышленность требует новых разработок, связанных с материалами, способными работать при экстраординарных условиях. К таким условиям нужно отнести работу при высоких температурах, работу под большими механическими нагрузками, а также работу при воздействии агрессивных сред (например, высокая кислотность) [1, 2]. Техническую керамику относят к материалам, способным работать в вышеприведенных условиях, однако требуется подстройка свойств распространенных материалов за счет изменений в технологии изготовления, а также модификации состава.

Высокой актуальностью характеризуются керамики с улучшенными прочностными и огнеупорными свойствами до экстремальных температур. Огнеупорность керамики определяется ее фазовым составом и микроструктурой [3]. Пористая или ячеистая микроструктура наиболее предпочтительна для изготовления огнеупоров. Коррозионная стойкость огнеупоров в значительной степени зависит от стабильности фаз и химических высокотемпературных реакций. Известно, что многие оксиды образуют эвтектики с SiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO при рабочих температурах огнеупора ($900 - 1800^\circ\text{C}$), которые разрушают его целостность через образование стекловидной фазы [4]. Одним из представителей дешевых и надежных огнеупоров является магний-алюминиевая шпинель. MgAl_2O_4 характеризуется высокой коррозионной стойкостью к большинству шлаков, использующихся в производстве, что также является преимуществом использования именно этого оксида. По сравнению с оксидом MgO данная шпинель имеет более низкую температуру плавления (2135°C), а следовательно, температуру синтеза (спекания), меньший коэффициент линейного температурного расширения и теплопроводность [5]. Жаропрочность керамики (способность материала выдерживать механические нагрузки при высоких температурах) определяется также составом керамики. При остывании огнеупорной керамики поле температур бывает неоднородно. Если учесть, что при этом происходит изменение линейных размеров кладки, некоторые части кладки могут остывать с разной скоростью, что приводит к возникновению трещин. Высокой трещиностойкостью, температурой плавления (2700°C) обладает стабилизированный диоксид циркония, характеризующийся высокой микротвердостью и низкой теплопроводностью. По некоторым литературным данным можно видеть, что керамика из диоксида циркония также является отличным кандидатом в качестве огнеупорной кладки, однако стоимость бадделеита выше, чем корунда и периклаза. Помимо этого из-за мартенситного перехода $t \rightarrow m$ в области 1200°C использование диоксида циркония может снижать функциональные свойства огнеупора, поскольку при этом переходе возникают значительные объемные деформации в кристаллической решетке.

В данной работе проводился эксперимент по получению армированной диоксидом циркония магниевой шпинели MgAl_2O_4 в виде поликристаллической керамики, полученной методом стандартной керамической технологии. Основной акцент в работе делается на подготовку пресс-порошков разной фракции для оптимизации механических характеристик финальной технической композитной керамики.

Материалы и методы

Для синтеза поликристаллических керамик в качестве исходных материалов использовались оксиды алюминия, циркония и магния квалификации ОСЧ. Перед применением реактивы высушивались в термошкафу при температуре 60°C в течение 12 ч. В качестве основного метода синтеза была выбрана стандартная керамическая технология, включающая смешение и помол исходных компонентов, формирование пресс-порошка, получение пресс-заготовок в виде таблеток и спекание при высоких температурах. Планетарная мельница Pulverisette 6 с размольными гарнитурами из WC использовалась для смешения оксидов MgO , Al_2O_3 и ZrO_2 . Соотношение между MgO и Al_2O_3 было выбрано таким, чтобы соответствовать химической реакции $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{MgAl}_2\text{O}_4$. К этой смеси были добавлены 20 и 40 вес. % бадделеита (ZrO_2). Смешение проводилось в течение 30 мин. со скоростью вращения чаши с шарами 250 об/мин.

Для улучшения гомогенности порошковой смеси в размольную гарнитуру добавлялся этиловый спирт до получения взвеси с консистенцией моторного масла. После помола порошки тщательно высушивались при температуре 60 °С, чтобы выпарить остаток спирта. Получение пресс-порошка из смеси оксидов было выполнено с использованием поливинилового спирта в качестве пластификатора. Разогретый до 90 °С водный раствор поливинилового спирта смешивался со смесью оксидов при активном перемешивании на магнитной мешалке. После выпаривания воды полученный порошок просеивался с помощью виброгрохота Analysette 3 Pro с ситами 45, 80, 100, 200, 500 мкм. Были получены различные фракции порошка для прессования: <45 мкм, 45 – 80 мкм, 80 – 100 мкм, 100 – 200 мкм, 200 – 500 мкм. Использование разных фракций пресс-порошка для изготовления керамики имеет место, поскольку от размера частиц зависит результат прессования. Так, известно, что при использовании мелких фракций наблюдается попадание частиц порошка в зазоры между матрицей и пуансоном (разные части пресс-формы), что снижает долю силы, приложенной непосредственно к прессуемому объему. В случае использования больших размеров частиц пресс-порошка (гранул) может наблюдаться образование макропор, которые останутся даже после процесса спекания. У прессованных заготовок в виде таблеток измерялись геометрические размеры для определения объемной усадки. Спекание керамики проводилось в печи резистивного типа Nabertherm LHT 08/18 в воздушной атмосфере при температуре 1700 °С в течение 5 ч. Качественный рентгенофазовый анализ по положениям рентгеновских рефлексов был выполнен на дифрактометре D8 Advance Eco (Bruker, Germany). Микроструктура исследовалась на микроскопе Hitachi 3030 при ускоряющем напряжении 15 кВ (картина обратно рассеянных электронов). Механические характеристики керамики косвенно оценивались через расчет прочности на дуосный изгиб, который определялся по формуле:

$$\sigma_t = \frac{3(1+\nu)P}{4\pi t^2} \left[1 + 2 \ln \frac{a}{b} + \frac{(1-\nu)}{(2+\nu)} \left(1 - \frac{b^2}{2a^2} \right) \frac{a^2}{R^2} \right], \quad (1)$$

где σ_t – прочность на дуосный изгиб, МПа;

P – нагрузка, Н;

ν – коэффициент Пуассона (0,3);

t – толщина таблетки, мм;

a – радиус окружности, на которой расположены сферические опоры, мм;

b – радиус шпильки, давящей на таблетку, мм;

R – радиус керамической таблетки, мм.

Измерение нагрузки проводилось на универсальной электромеханической одностоечной машине WalterBai LFM-L 10 kN с использованием металлической шпильки и опоры со сферическими опорами (из стали). Таблетка устанавливалась на опору в соответствии с рисунком 1. Тест проводился при постоянной скорости изменения положения подвижной траверсы (0,5 мм/сек) до наступления разрушения таблетки.

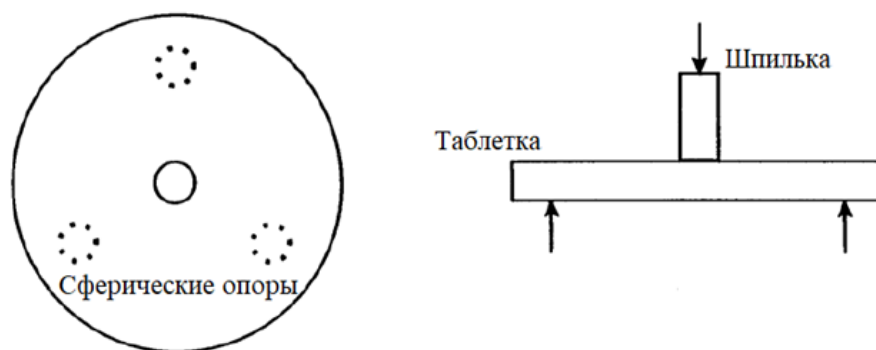


Рисунок 1 – Пояснение к измерению прочности на дуосный изгиб

Обзор литературы

Ранее проводились работы по получению армированного кубического диоксида циркония алюминатом магния [6]. Было установлено, что методом искрового плазменного спекания имеется возможность синтезировать плотную керамику при температуре 1400 °С в течение 30 мин и давлением 40 МПа. Путем внедрения в состав MgAl_2O_4 в YSZ (кубическая фаза) удалось улучшить фазовую стабильность керамики при низкотемпературной деградации, увеличить микротвердость (с 10 до 14 ГПа), снизить пористость (с 3 до 0,4%), а также увеличить прочность на сжатие (1,2 до 1,8 ГПа). Упрочнение керамики объяснялось большим содержанием стабилизированной фазы кубического диоксида циркония. В то же время наблюдалось снижение трещиностойкости керамики из-за появления фазы шпинели.

В работе [7] проводились эксперименты по получению стойкой к растрескиванию керамики $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$. Авторы отмечают, что распространение трещины останавливается на зернах фазы бадделеита. Эффект упрочнения керамики при добавке к MgAl_2O_4 фазы диоксида циркония также обнаружили в работе [8]. Выделяется два механизма упрочнения композита шпинель-диоксид циркония: 1) упрочнение за счет фазовой трансформации $t \rightarrow m$ в тетрагональной фазе диоксида циркония, после которого следует возникновение механически напряженной области вокруг зерен ZrO_2 , которые отклоняют или останавливают распространение трещины; 2) остановка трещин на зерне диоксида циркония. Данные теоретические подходы были разработаны преимущественно для упрочненной диоксидом циркония алюмооксидной керамики, но могут быть распространены на другие композитные оксидные керамики, включая MgAl_2O_4 .

Таким образом, эксперимент по получению керамики методом стандартной керамической технологии с вариацией фракции пресс-порошка является актуальным.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлены расчетные данные по объемной усадке (рисунок 2а) и кажущейся плотности (рисунок 2б) в зависимости от использованной фракции пресс-порошка. Объемная усадка рассчитывалась через измерение объема таблетки до спекания и после спекания. Можно отметить, что для композита с добавлением 20 вес. % диоксида циркония усадка составила 31–34% и не показывала выраженной зависимости от фракции. Выраженная зависимость от фракции наблюдалась для таблеток алюмината магния: для фракции < 45 мкм усадка возросла с 21 до 28%; также рост наблюдался для фракции 100–200 мкм. В случае композита с массовой концентрацией бадделеита 40% наблюдается выраженная просадка в значении усадки для фракции 80–100 мкм. Возможное объяснение этому можно найти в том, что распределение размеров во фракции было смещено к 100 мкм, что не позволило получить плотной упаковки в пресс-заготовке. Общая тенденция в среднем показывает, что с увеличением концентрации ZrO_2 в составе керамики увеличивается усадка с 21% до ~ 35%. Выраженные зависимости от фракции или «выбросы» значений усадки указывают на то, что при синтезе композитных керамик $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ через пресс-заготовки следует использовать определенные фракции для достижения наибольшей усадки.

Несмотря на колебания значений усадки для образцов MgAl_2O_4 и $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 масс. %), на рисунке 2а зависимости кажущейся плотности от фракции не показывают значительных изменений за исключением фракции < 45 мкм (рисунок 2б). Можно сделать вывод, что для вышеотмеченных образцов спекание наилучшим образом проходит при наименьших размерах порошинок в пресс-порошке. Максимальная плотность наблюдается при использовании фракции < 45 мкм для всех синтезированных композитных керамик, что говорит о получении наиболее плотного компакта перед спеканием. Увеличение плотности с внедрением фазы ZrO_2 в состав керамики объясняется более высокой плотностью бадделеита и интенсификацией

процесса спекания. Ход кривой для образца с 40 вес.% на рисунке 2б совпадает с ходом кривой на рисунке 2а.

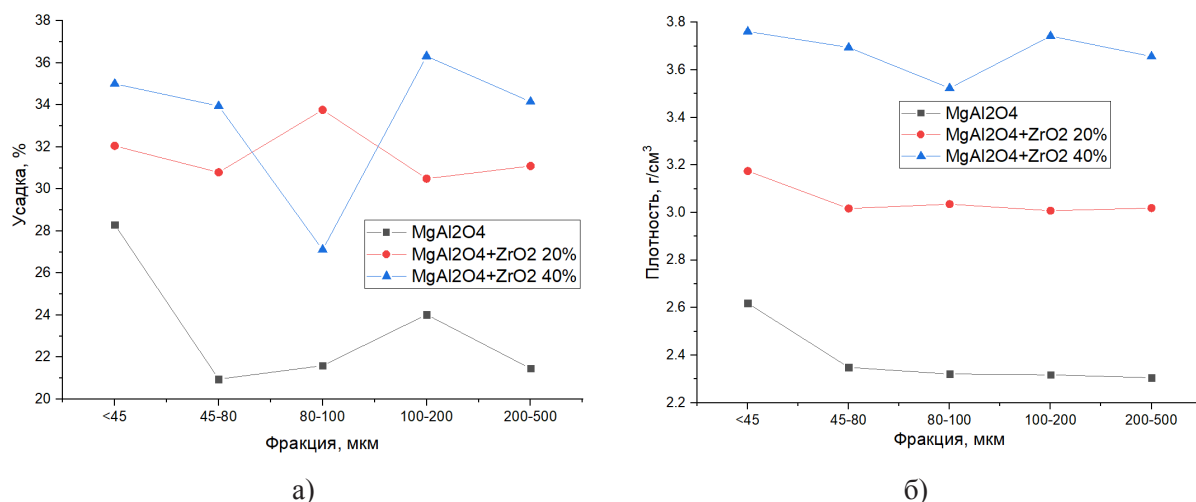
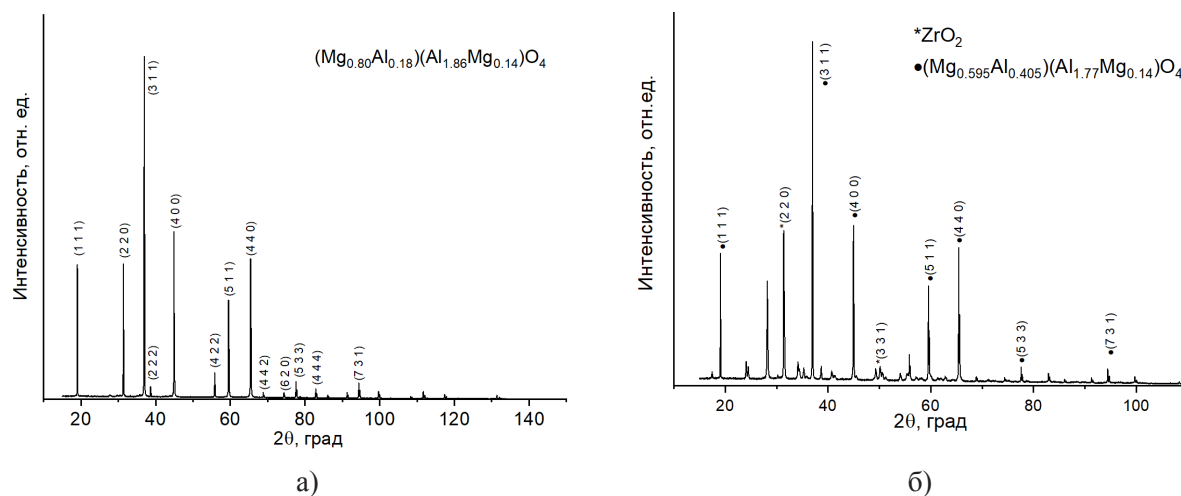
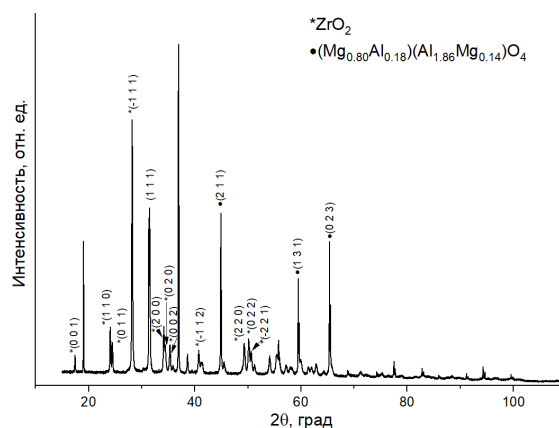


Рисунок 2 – Зависимость значений объемной усадки (а) и кажущейся плотности (б) от фракции пресс-порошка

На рисунке 3 представлены дифрактограммы синтезированных керамик для образцов, полученных из фракции <45 мкм. Для таблеток, полученных из других фракций, дифрактограммы были аналогичны. Видно, что фазовый состав керамик представлен исключительно фазами кубического алюмината магния и бадделеита. Фазовый состав был выполнен с использованием базы данных PDF-2016 и программы DiffracEva Bruker. Можно отметить, что положения рефлексов (и их интенсивности) фаз по углу 2θ шпинели различались в пределах 0.02–0.05, что говорит о различном распределении катионов по подрешеткам и изменяющемся параметре решетки [9]. На дифрактограммах приведены составы алюминатов с распределением по подрешеткам (тетраэдрической и октаэдрической) согласно использованным карточкам PDF-2016. Важной особенностью полученных дифрактограмм является то, что стабилизации t- или c- не наблюдается, что говорит о протекании только одной реакции $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{MgAl}_2\text{O}_4$.

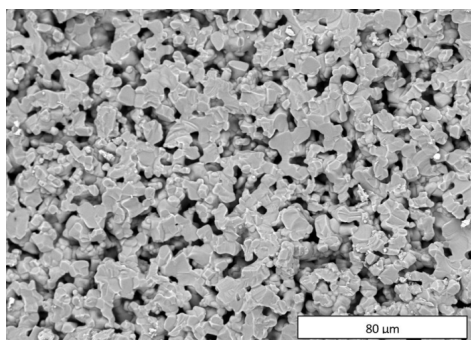


Продолжение рисунка 3

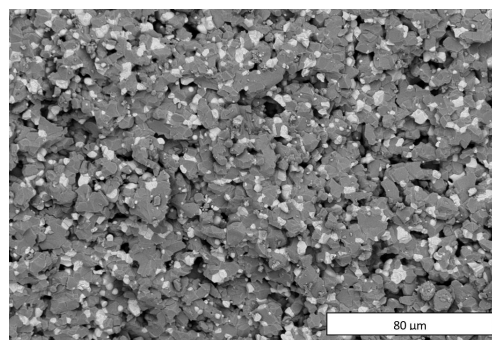


в)

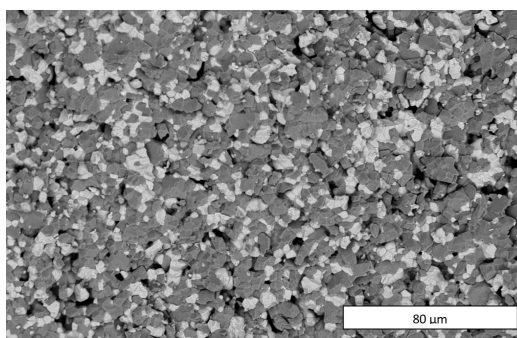
Рисунок 3 – Дифрактограммы синтезированных керамик для MgAl_2O_4 (а), $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) (б) и $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) (в)



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Микроснимки СЭМ поперечных сколов синтезированных керамик для MgAl_2O_4 (а), $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) (б) и $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) (в)

Микроструктура поперечных сколов керамики представлена на рисунке 4. По аналогии с рисунком, посвященным рентгеновским дифрактограммам, ниже приводятся микроснимки СЭМ для образцов, полученных из фракции пресс-порошка < 45 мкм. Это обусловлено идентичностью особенностей микроструктуры для всех синтезированных образцов. Как видно из рисунка, керамики характеризуются высокой пористостью и хорошей спаянностью отдельных зерен. Спекание при температуре 1700°C позволяет протекать процессам диффузии атомов через границы зерен с высокой интенсивностью, что, в свою очередь, создает хорошую спаянность между соседними гранями [10]. Высокая пористость алюмината магния может

быть вызвана малым временем выдержки, а также недостаточным давлением при формовании пресс-заготовки. Также важной особенностью исследуемой микроструктуры является то, что зерна бадделеита (светлые области на рисунках 4б, 4в) расположены не по границам зерен шпинельной фазы, а распределены равномерно между зернами MgAl_2O_4 .

На рисунке 5 показаны гистограммы распределения зерен по размеру для каждой из фаз, обнаруженных на микрофотографиях СЭМ. Уменьшение среднего размера и смещение максимума распределения влево для зерен фазы MgAl_2O_4 может быть связано с ингибированием процесса спекания. По-видимому, равномерное распределение зерен бадделеита препятствует диффузии атомов Mg, Al между частицами MgO , Al_2O_3 при достижении высоких температур.

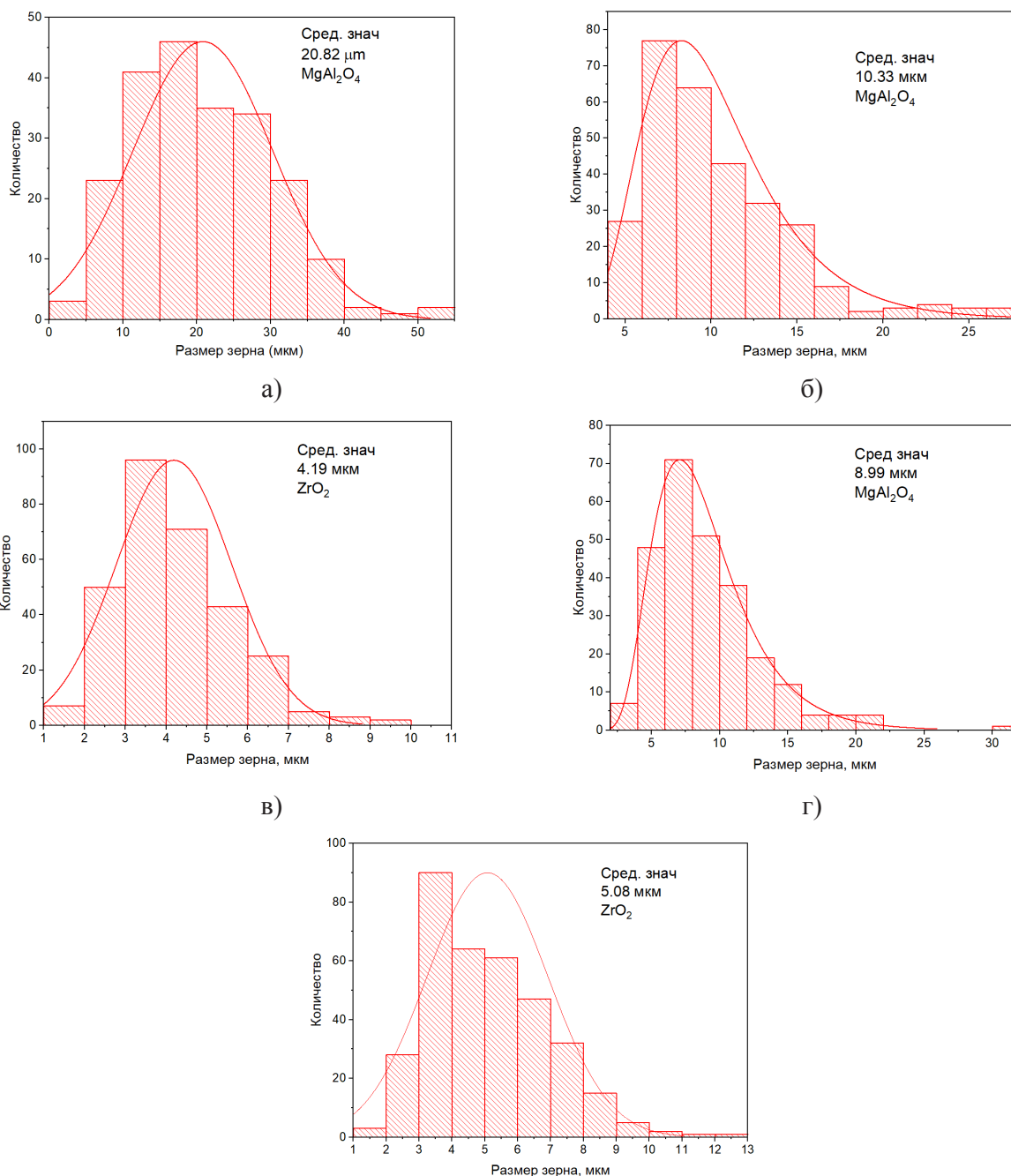


Рисунок 5 – Гистограммы распределения размеров зерен для MgAl_2O_4 (а), $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) (б, в) и $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) (г, д)

Зависимости прочности на двусосный изгиб для синтезированных образцов приведены на рисунке 6. Как видно из рисунка, наблюдается выраженная зависимость прочности от использованной фракции пресс-порошка: с уменьшением фракции прочность на двусосный изгиб возрастает. Для образцов с фракцией < 45 мкм наблюдаются максимальные значения прочности. Это объясняется наибольшей плотностью образцов (рисунок 2б). Зависимость прочности на двусосный изгиб от фракции для образцов $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (40 вес.%) коррелирует с зависимостями на рисунках 2а, 2б, что говорит об определяющем влиянии пористости (плотности) на механические свойства керамики. Для серии образцов MgAl_2O_4 , $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ (20 вес.%) подобной корреляции не наблюдается. Из анализа зависимостей прочности установлено, что внедрение 40 вес.% бадделеита к MgAl_2O_4 наблюдается увеличение прочности на двусосный изгиб. Механизм упрочнения в данной композитной керамике аналогичен тому, что приводили в работе [8]. При равномерном распределении в объеме матрицы MgAl_2O_4 зерен диоксида циркония создается ситуация, при которой распространение трещин на зернах ZrO_2 не происходит. Помимо этого увеличивается плотность керамики, что приводит к меньшей пористости. Поскольку поры могут быть концентраторами дефектов в поликристаллах, распространение трещин проходит через скопления пор. При концентрации 20 вес.% улучшение механических характеристик не наблюдается, что может быть связано с тем, что при малой концентрации зерен бадделеита трещины, вызванные приложением силы, с большей вероятностью находят путь для распространения в объеме керамики.

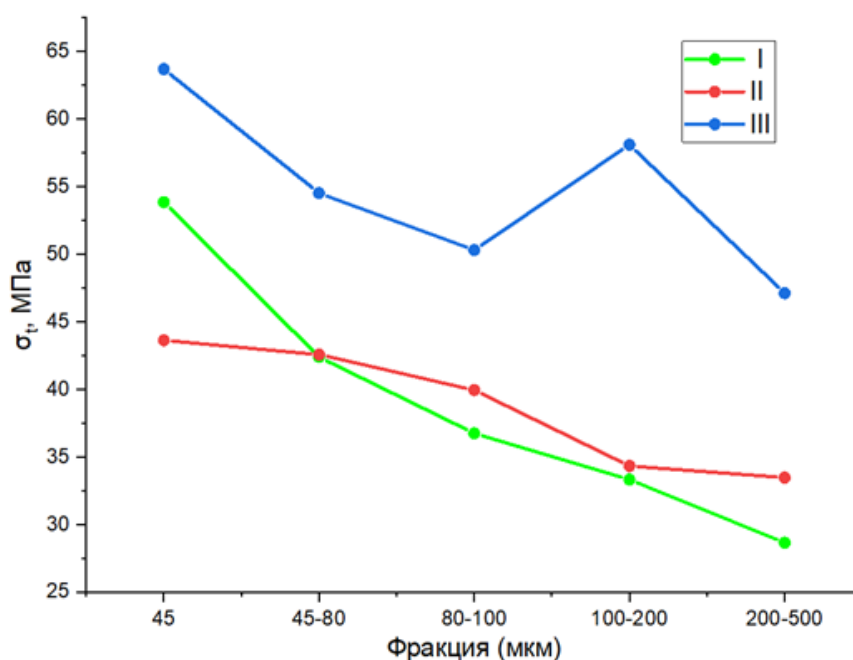


Рисунок 6 – Зависимость прочности на двусосный изгиб от фракции для полученных таблеток
I – магний алюминиевая шпинель, II – композит 20%, III – композит 40%

Заключение

В ходе проведения эксперимента по синтезу керамических образцов $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{+ZrO}_2$ твердофазным спеканием было установлено:

1) При спекании пресс-заготовок смесей ZrO_2 (0, 20, 40 масс. %) + $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ образуются исключительно фазы шпинели и моноклинного диоксида циркония (бадделеит). Образование с-фазы оксида циркония не наблюдается;

2) Использование различных фракций пресс-порошков приводит к изменению усадки и плотности финальных спеченных образцов. Помимо этого, не обнаружено явных зависимостей изменения усадки и плотности от фракции пресс-порошков;

3) Добавка ZrO_2 к алюминату магния приводит к уменьшению среднего размера зерна фазы шпинели. В целом микроструктура полученных керамик показывает отличную спаянность зерен $MgAl_2O_4$ и равномерное распределение зерен диоксида циркония в объеме;

4) Добавка ZrO_2 к алюминату магния приводит к увеличению прочности на двухосный изгиб. Были получены явно выраженные зависимости увеличения механической прочности керамик в виде таблеток с уменьшением фракции пресс-порошка, использованного для изготовления керамики.

Разработанные керамики потенциально пригодны для использования в металлургии в качестве огнеупоров и кладки. Для дополнительного упрочнения керамических огнеупоров из $MgAl_2O_4$ рекомендуется использовать добавку диоксида циркония 40 масс.%

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR21882390)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Основы технической керамики: учебное пособие /Н.Ю. Черкассова, С.В. Веселов, Д.В. Дудина, Р.И. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 106 с.
- 2 Гаршин А.П. Материаловедение. Техническая керамика в машиностроении: учебник для вузов / А.П. Гаршин. – 2-е изд., испр. и доп. –М.: Издательство Юрайт, 2024. – 296 с.
- 3 Sadik C., El Amrani I. E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: A review //Journal of Asian Ceramic Societies. – 2014. – Vol. 2. – No. 2. – P. 83–96.
- 4 Smith J.D., Fahrenholtz W.G. Refractory oxides // Ceramic and Glass Materials. – 2008. – P. 87.
- 5 Braulio M.A.L. et al. Spinel-containing alumina-based refractory castables // Ceramics International. – 2011. – Vol. 37. – No. 6. – P. 1705–1724.
- 6 El-Amir A.A.M. et al. $MgAl_2O_4$ -reinforced c- ZrO_2 ceramics prepared by spark plasma sintering // Journal of the Korean Ceramic Society. – 2021. – Vol. 58. – No. 5. – P. 574–582.
- 7 Fouad O.A. et al. Fabrication and characterization of macroporous alumina-nano tetragonal zirconia-nano spinel ceramic composites // Materials Chemistry and Physics. – 2023. – Vol. 301. – P. 127617.
- 8 Ganesh I., Ferreira J.M.F. Synthesis and characterization of $MgAl_2O_4$ - ZrO_2 composites // Ceramics international. – 2009. – Vol. 35. – No. 1. – P. 259–264.
- 9 Shakirzyanov R.I., Borgekov D.B., Garanin Y.A., Kozlovskiy A.L., Volodina N.O., Shlimas D.I., Zdorovets M.V. Study of the effect of synthesis temperature and thermal aging on structural, dielectric properties and phase composition in $NiO/NiAl_2O_4$ composite ceramics // Materials Research Express. – 2024. – Vol. 11. – No. 7. – P. 075507.
- 10 Boch P. Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications / ed. Nièpce J.-C. – 2007.

REFERENCES

- 1 Cherkassova N.Ju., Veselov S.V., Dudina D.V. and Kuz'min R.I. (2023) Osnovy tehnikeskoy keramiki: uchebnoe posobie, Novosibirsk: NGTU, p 106. [In Russian]
- 2 Garshin A.P. (2024) Materialovedenie. Tehnicheskaja keramika v mashinostroenii: uchebnik dlja vuzov. 2-e izd., ispr. i dop., Moscow: Jurajt, p. 296. [In Russian]
- 3 Sadik C., El Amrani I.E., Albizane A. (2014) Recent advances in silica-alumina refractory: A review. Journal of Asian Ceramic Societies, vol. 2, no. 2, pp. 83–96.
- 4 Smith J.D., Fahrenholtz W.G. (2008) Refractory oxides. Ceramic and Glass Materials, p. 87.

- 5 Braulio M.A.L. et al. (2011) Spinel-containing alumina-based refractory castables. *Ceramics International*, vol. 37, no. 6, pp. 1705–1724.
- 6 El-Amir A.A.M. et al. (2021) $MgAl_2O_4$ -reinforced c- ZrO_2 ceramics prepared by spark plasma sintering. *Journal of the Korean Ceramic Society*, vol. 58, no. 5, pp. 574–582.
- 7 Fouad O.A. et al. (2023) Fabrication and characterization of macroporous alumina-nano tetragonal zirconia-nano spinel ceramic composites. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 301, p. 127617.
- 8 Ganesh I., Ferreira J.M.F. (2009) Synthesis and characterization of $MgAl_2O_4$ - ZrO_2 composites. *Ceramics international*, vol. 35, no. 1, pp. 259–264.
- 9 Shakirzyanov R.I., Borgekov D.B., Garanin Y.A., Kozlovskiy A.L., Volodina N.O., Shlimas D.I., Zdorovets M.V. (2024) Study of the effect of synthesis temperature and thermal aging on structural, dielectric properties and phase composition in $NiO/NiAl_2O_4$ composite ceramics. *Materials Research Express*, vol. 11, no. 7, p. 075507.
- 10 Boch P. (2007) *Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications*, ed. Nièpce J.-C.

^{1,2}**Боргеков Д.Б.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-9727-0511,
e-mail: borgekov@inp.kz

^{1,2}**Шлимас Д.И.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-2454-7177 ,
e-mail: shlimas@mail.ru

^{1*}**Шакирзянов Р.И.,**

к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0001-9908-3034,
*e-mail: shakirzyanov_ri@enu.kz

^{1,2}**Гаранин Ю.А.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-0759-4329,
e-mail: jorge.r2448@gmail.com

¹**Мазных С.А.,**

ORCID ID: 0009-0008-0601-8865,
e-mail: sofiyamaznykh@gmail.com

¹**Володина Н.О.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-0109-7102,
e-mail: natalia00volodina@gmail.com

^{1,2}**Козловский А.Л.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8832-7443,
e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

^{1,2}**Здоровец М.В.,**

к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0003-2992-1375,
e-mail: mzdorovets@gmail.com

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан
²Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Ядролық физика институты,
Алматы қ., Қазақстан

ЦИРКОНИЙ ДИОКСИДИМЕН НЫҒАЙТЫЛҒАН МАГНИЙ-АЛЮМИНАТ КЕРАМИКАСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Техникалық керамиканың механикалық қасиеттерін жақсарту – заманауи керамика материалтануындағы өзекті міндеттердің бірі. Әсіресе, $MgAl_2O_4$ шпинелі негізіндегі отқа төзімді материалдардың ме-

ханикалық қасиеттерін жақсарту қажет, себебі бұл шпинель жоғары температуралық коррозияға төзімділігімен ерекшеленеді. Бұл жұмыс $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ керамикасының микроструктурасын, фазалық құрамын және механикалық қасиеттерін зерттеуге арналған. Эксперименттік үлгілер ұнтақ компакттерінен қатты фазалық әдіспен синтезделді. Микроструктура мен фазалық құрамды кешенді зерттеу үшін сәйкесінше сканерлеуші электрондық микроскопия және рентгендік дифракция әдістері қолданылды. Керамикалық үлгілердің механикалық қасиеттері екі осьті иілу кезіндегі таблеткалардың беріктігін өлшеу арқылы зерттелді. Композициялық керамиканың механикалық қасиеттерін жақсарту мақсатында магний алюминатты цирконий диоксидімен нығайту жүргізілді. Пресс-ұнтақтың үлесі өзгергенде $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ керамикалық үлгілерінің шөгуіне, тығыздығына және механикалық қасиеттеріне әсер ететіндігі анықталды.

Тірек сөздер: магний алюминаты, шпинель, бадделейит, екі осьтік иілу күші.

^{1,2}**Borgekov D.B.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-9727-0511,

e-mail: borgekov@inp.kz

^{1,2}**Shlimas D.I.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-2454-7177,

e-mail: shlimas@mail.ru

¹***Shakirzyanov R.I.,**

Cand.Phys.-Math.Sc.,

ORCID ID: 0000-0001-9908-3034,

*e-mail: shakirzyanov_ri@enu.kz

^{1,2}**Garanin Yu.A.,**

Master, ORCID ID: 0000-0002-0759-4329,

e-mail: jorge.r2448@gmail.com

¹**Maznykh S.A.,**

ORCID ID: 0009-0008-0601-8865,

e-mail: sofiyamaznykh@gmail.com

¹**Volodina N.O.,**

Master, ORCID ID: 0000-0002-0109-7102,

e-mail: natalia00volodina@gmail.com

^{1,2}**Kozlovskiy A.L.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8832-7443,

e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

^{1,2}**Zdorovets M.V.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0003-2992-1375,

e-mail: mzdorovets@gmail.com

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan,
Almaty, Kazakhstan

STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZIRCONIUM DIOXIDE REINFORCED MAGNESIUM ALUMINATE CERAMICS

Abstract

Improving the mechanical properties of technical ceramics is an urgent task of modern ceramic materials science. There is a need to improve the mechanical properties of refractories based on MgAl_2O_4 spinel, since this spinel is characterized by impeccable resistance to high-temperature corrosion. The work is devoted to studying the microstructure, phase composition and mechanical properties of $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ ceramics. Experimental samples

were synthesized by the solid-phase method from powder compacts. For a comprehensive study of the microstructure and phase composition, scanning electron microscopy and X-ray diffraction were used. The mechanical properties of the ceramic samples were studied by measuring the strength of tablets in biaxial bending. Reinforcement of magnesium aluminate with zirconium dioxide was carried out to improve the mechanical properties of composite ceramics. It was found that a change in the fraction of the press powder can affect the shrinkage, density and mechanical properties of $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ ceramic samples.

Key words: magnesium aluminate, spinel, baddeleyite, biaxial flexural strength.

Дата поступления статьи в редакцию: 27.10.2024