

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 666.63+666.3.017

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-73-80>

Поступила в редакцию 20.02.2023

Received 20.02.2023

Р. Ю. Попов, Е. О. Богдан, О. А. Сергиевич, Е. М. Дятлова

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ НА СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния замещения оксида магния оксидом цинка в системе $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, введения предварительно синтезированного ганита ZnAl_2O_4 на процессы спекания, фазообразования и термическое расширение синтезированных материалов. Установлено, что при замещении 4 % MgO на ZnO синтезированный при температуре 1 150 °С керамический материал характеризовался более высокими значениями кажущейся плотности (не менее 1 835 кг/м³), механической прочности при сжатии (300 МПа) и термостойкости (более 80 термоциклов), а также низким значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) ($-0,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), что обусловлено формированием кристаллических фаз сподумена, шпинели, форстерита, корунда, ганита и кварца.

Ключевые слова: термостойкая керамика, система $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, оксид цинка, ганит, синтез, фазовый состав, температурный коэффициент линейного расширения, термостойкость, механическая прочность

Для цитирования. Влияние цинксоодержащих соединений на свойства керамических материалов, полученных на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ / Р. Ю. Попов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 73–80. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-73-80>

R. Yu. Popov, E. O. Bogdan, O. A. Sergievich, E. M. Dyatlova

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

INFLUENCE OF ZINC-CONTAINING COMPOUNDS ON THE PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS BASED ON THE $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ SYSTEM

Abstract. The results of a study the influence of magnesium oxide substitution with zinc oxide in the $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system, as well as the introduction of pre-synthesized ganite ZnAl_2O_4 , on sintering, phase formation and thermal expansion of synthesized materials are presented. It was found that after substitution of 4 % magnesium oxide MgO with zinc oxide ZnO , the ceramic material synthesized at a temperature of 1 150 °C was characterized by higher values of apparent density (not less than 1 835 kg/m³), mechanical compressive strength (300 MPa), and heat resistance (more than 80 thermal cycles), as well as low values of LTEC ($-0,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), which is due to the formation of crystalline phases of spodumene, spinel, forsterite, corundum, ganite and quartz.

Keywords: heat-resistant ceramics, $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system, zinc oxide, ganite, synthesis, phase composition, linear thermal expansion coefficient, heat resistance, mechanical strength

For citation. Popov R. Yu., Bogdan E. O., Sergievich O. A., Dyatlova E. M. Influence of zinc-containing compounds on the properties of ceramic materials based on the $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 1, pp. 73–80 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-73-80>

Введение. Интенсивное развитие новых отраслей высокотемпературной техники сопряжено с применением большого количества разнообразных конструкционных материалов, способных работать в современных установках (индукторы, печи сопротивления, лазеры, плазмотроны и т. п.) в условиях резких температурных перепадов, не разрушаясь при этом и сохраняя высокие показатели механических, электро- и теплофизических свойств. Такие материалы должны обладать одновременно не только требуемыми показателями механической прочности, стойкости к воздействию высоких температур, но и быть термостойкими [1–4].

Термостойкость является важнейшим показателем свойств керамических изделий, предназначенных для эксплуатации в условиях частой смены температуры. Это комплексный критерий, который в первую очередь определяется такими свойствами материала, как механическая прочность, теплопроводность и ТКЛР. При этом одним из основных факторов, определяющих стойкость материалов к термоудару, является низкое значение его ТКЛР.

Литературные данные свидетельствуют о том, что для получения керамических материалов с низким ТКЛР (менее $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) выбор проектируемых кристаллических фаз весьма ограничен [5]. Наибольший интерес для этих целей представляют керамические материалы, полученные на основе кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), алюмосиликатов лития (сподумен $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, петалит $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$, эвкрипит $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$), титаната алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$). Указанные соединения характеризуются сильно выраженной анизотропией термического расширения кристаллической решетки, что обуславливает чрезвычайно низкие значения ТКЛР материалов на их основе [5].

Однако данные материалы обладают существенными недостатками. Например, кордиеритовая и тиалитовая керамика характеризуется низкими значениями плотности и механической прочности; литийсодержащие материалы обладают недостаточно высокими электроизоляционными и огнеупорными свойствами; титанаты алюминия – нестабильны по ТКЛР, величина которого может колебаться от $-0,44 \cdot 10^{-6}$ до $19 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в зависимости от условий синтеза и наличия примесей. При этом все указанные выше материалы характеризуются узким интервалом спекания [3–4].

Исходя из анализа обзора литературы в настоящей работе для проектирования составов керамических материалов с близким к нулю ТКЛР выбрана четырехкомпонентная система $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, на основе которой будут синтезированы материалы, лежащие в полях кристаллизации малорасширяющихся фаз. Перспективным направлением также является модифицирование выбранной четырехкомпонентной системы оксидами двухвалентных металлов путем эвмолярной замены MgO или синтезированными кристаллическими соединениями, характеризующимися низкими значениями ТКЛР [6–7].

Целью настоящей работы являлось изучение влияния замещения оксида магния, вводимого тальком, оксидом цинка в системе $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, а также введения предварительно синтезированного ганита ZnAl_2O_4 на процессы спекания, фазообразования и термическое расширение синтезированных материалов.

Материалы и методы. В качестве исходных сырьевых материалов использовались тальк онотского месторождения (ГОСТ 19729–74), технический глинозем марки ГК-1 (ГОСТ 30559–98), глина «Гранитик-Веско» Веселовского месторождения. Для модифицирования исследуемой системы применяли следующие химические соединения: карбонат литий Li_2CO_3 (марка «ч.», ТУ 6-09-3728-83) и оксид цинка ZnO (марка «ч.», ГОСТ 10262-73).

Образцы керамических материалов получали методом полусухого прессования. Массу готовили путем тщательного перемешивания в сухом виде исходных компонентов, предварительно измельченных до остатка 1–2 % на сите № 008 с последующим увлажнением до 8–10 % и гранулированием с помощью сита с размерами отверстий 1,0 мм. Полученный порошок подвергали вылеживанию в течение суток в закрытой таре для усреднения по влажности. Образцы формовали в виде дисков, цилиндров и балочек с помощью гидравлического пресса при давлении прессования 20 МПа. Изготовленный полуфабрикат высушивали в лабораторной электрической сушилке SNOL (Литва) при температуре $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Затем образцы обжигали в лабораторной электрической печи фирмы SNOL 1,6,2,5.1/13,5-Y1 (Литва) при температурах 1 150 и 1 200 $^\circ\text{C}$ с выдержкой при максимальной температуре 1 ч, скорость подъема температуры составляла 250 $^\circ\text{C}/\text{ч}$.

ТКЛР в диапазоне температур 20–400 $^\circ\text{C}$ определяли с помощью электронного dilatометра DIL 402 PC (NETSCH, Германия) по ГОСТ 10978.

Рентгеновские дифрактограммы получали на дифрактометре D8 ADVANCED фирмы Bruker (Германия) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения при комнатной температуре в диапазоне углов $2\theta = 20\text{--}80^\circ$. Для идентификации кристаллических фаз применялась международная картотека Joint Comitie on Powder Diffraction Standarts и программное обеспечение DIFFRAC PLUS фирмы Bruker.

Определение кажущейся пористости, плотности, водопоглощения синтезированных материалов выполняли в соответствии с ГОСТ 2409 методом насыщения и гидростатического взвешивания.

Определение механической прочности при сжатии проводилось при помощи универсальной электромеханической испытательной машины Galdabini Quasar 100 (Италия). Нагружали образцы до полного разрушения со скоростью 2 МПа/мин.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе исследований были спроектированы составы и синтезированы керамические материалы на основе четырехкомпонентной системы $\text{Li}_2\text{O}\text{--}\text{MgO}\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}\text{SiO}_2$ в сечении, ограниченном содержанием компонентов, %¹: SiO_2 – 25–65, Al_2O_3 – 10–70, MgO – 0–10 при постоянном содержании Li_2O в количестве 5,0 %. Изучение особенностей фазообразования в исследуемой системе во взаимосвязи с термическим расширением полученных материалов позволило установить, что оптимальными по свойствам являются материалы, полученные на основе состава, содержащего, %: SiO_2 – 45, Al_2O_3 – 40, MgO – 10, Li_2O – 5. Синтезированные при температуре 1 200 °С образцы оптимального состава характеризовались наименьшим значением ТКЛР, равным $1,84 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, который обеспечивался преимущественно коэффициентом линейного расширения основной кристаллической фазы – сподумена и сопутствующих фаз – форстерита и шпинели.

На втором этапе исследований изучалась возможность получения керамического материала на основе оптимального состава с еще более низким ТКЛР (то есть ниже, чем $1,84 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) путем введения различных минерализаторов: оксида цинка ZnO и предварительно синтезированного ганита ZnAl_2O_4 .

В оптимальном составе проведена замена оксида магния на оксид цинка до полного его замещения (табл. 1).

Таблица 1. Составы цинксодержащих масс на основе оптимального состава

Table 1. Compositions of zinc-containing masses based on optimal composition

Наименование сырьевых материалов	Номера составов и содержание сырьевого материала, %					
	1 (оптимальный)	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5
Тальк онотский	31,15	24,90	18,69	12,46	6,23	–
Глина «Гранитик-Веско»	47,50	54,78	62,00	69,20	76,50	83,70
Глинозем	25,53	23,23	21,22	19,07	16,69	14,76
Карбонат лития Li_2CO_3	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65	12,65
Оксид цинка ZnO	–	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00

Визуальная оценка образцов, синтезированных по приведенной выше методике, позволила установить, что оптимальная температура обжига – 1 150 °С. Увеличение содержания ZnO в составах масс приводит к вспучиванию образцов при температуре синтеза 1 200 °С, что связано, вероятно, с формированием большого количества расплава, обогащенного оксидом цинка.

Рентгенофазовый анализ полученных материалов позволил установить, что фазовый состав всех синтезированных образцов представлен кристаллическими фазами сподумена, форстерита, кварца и корунда, содержание которых почти не зависит от количества вводимого оксида цинка. Несколько иные закономерности наблюдаются при формировании фаз шпинели и ганита. Установлено, что при введении в состав массы ZnO в количестве 2 % на дифрактограммах появляются дифракционные максимумы, характерные для кристаллической фазы ганита ZnAl_2O_4 , причем их интенсивность повышается по мере увеличения количества вводимого оксида цинка вплоть до 10 %. При этом интенсивность дифракционных максимумов, характерных для шпинели MgAl_2O_4 , уменьшается вплоть до ее полного исчезновения при полном замещении оксида магния на оксид цинка в синтезированных материалах.

В связи с тем что основной задачей настоящей работы являлся синтез малорасширяющейся керамики, нами детально изучена зависимость ТКЛР образцов от содержания оксида цинка.

Зависимость температурного коэффициента линейного расширения образцов, синтезированных при 1 150 °С, от содержания оксида цинка представлена на рис. 1.

¹ Здесь и далее по тексту приведено массовое содержание, мас. %.

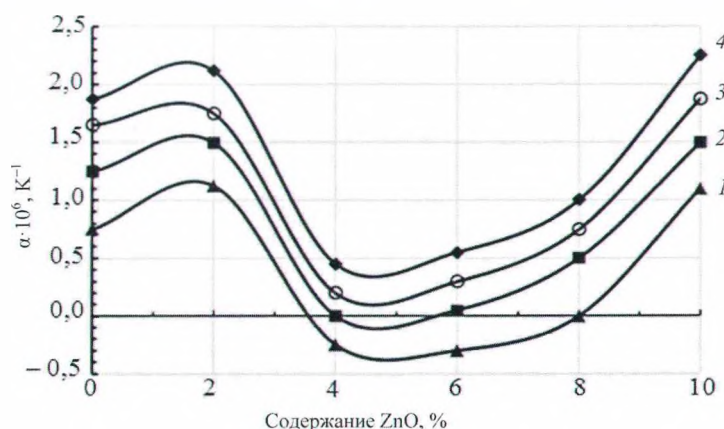


Рис. 1. Зависимость ТКЛР образцов от содержания ZnO при различных температурах измерения: 1 – 100 °C; 2 – 200 °C; 3 – 300 °C; 4 – 400 °C

Fig. 1. Dependence of the linear thermal expansion coefficient of samples on the content of ZnO at various measurement temperatures: 1 – 100 °C; 2 – 200 °C; 3 – 300 °C; 4 – 400 °C

Анализ приведенных графических зависимостей показывает, что при увеличении содержания ZnO в образцах до 2 % наблюдается рост ТКЛР при каждой температурной экспозиции. При дальнейшем увеличении содержания ZnO до 4 % наблюдается резкое уменьшение ТКЛР до значений от $(+0,5 \cdot 10^{-6})$ до $(-0,25 \cdot 10^{-6})$ K⁻¹. Повышение содержания ZnO от 4 до 6 % не приводит к существенному росту ТКЛР образцов. Сопоставляя эти данные с результатами рентгенофазового анализа, можно предположить, что при введении в составы масс оксида цинка в количестве 4–6 % формируется кристаллическая фаза ганита ZnAl_2O_4 , которая образует твердый раствор со шпинелью MgAl_2O_4 , что, в свою очередь, обуславливает снижение способности керамики к термическому расширению и обеспечивает материалам ТКЛР в диапазоне от $(+0,6 \cdot 10^{-6})$ до $(-0,25 \cdot 10^{-6})$ K⁻¹.

При увеличении содержания в составах масс оксида цинка от 6 до 10 % наблюдается резкое увеличение ТКЛР синтезированных образцов до значений $(1,1\text{--}2,25) \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ в зависимости от температуры экспозиции. Это объясняется, скорее всего, увеличением количества стекловидной фазы и частичным растворением малорасширяющихся фаз (MgAl_2O_4 и ZnAl_2O_4), что подтверждено результатами изучения показателей спекания, а также рентгенофазовым анализом.

Далее проводилось исследование влияние ганита ZnAl_2O_4 на термическое расширение синтезированных материалов. Для синтеза ганита использовали оксиды ZnO и Al_2O_3 в соотношении, соответствующем теоретическому составу ZnAl_2O_4 , с последующим их спеканием при температуре 1 200 °C в течение 2 ч. На рентгеновской дифрактограмме синтезированного ганита отмечаются только дифракционные максимумы, соответствующие кристаллической фазе ZnAl_2O_4 (рис. 2).

Полученный спек измельчали до частиц размером менее 0,063 мм и вводили в оптимальный состав массы (состав 1 в табл. 1) в количестве 5, 10 и 15 % сверх 100 %. Керамические образцы получали по описанной выше методике при температуре обжига 1 150 и 1 200 °C. Синтезированные образцы характеризовались плотноспеченной структурой и окраской белого цвета.

Результаты исследования температурного коэффициента линейного расширения синтезированных образцов представлены на рис. 3. Установлено, что значения ТКЛР образцов, синтезированных при 1 150 °C, выше и составляют от $(0,75\text{--}1,5) \cdot 10^{-6}$ до $(1,7\text{--}2,5) \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ по сравнению с образцами, обожженными при 1 200 °C, для которых ТКЛР находится в диапазоне от $(-0,4\text{--}0,15) \cdot 10^{-6}$ до $(0,4\text{--}0,83) \cdot 10^{-6}$ K⁻¹. Это свидетельствует о более полном протекании процессов спекания и фазообразования при температуре 1 200 °C.

На рис. 4 приведена зависимость ТКЛР (при температуре экспозиции 400 °C) полученных образцов от количества введенного ганита. Установлено, что при содержании ганита в количестве

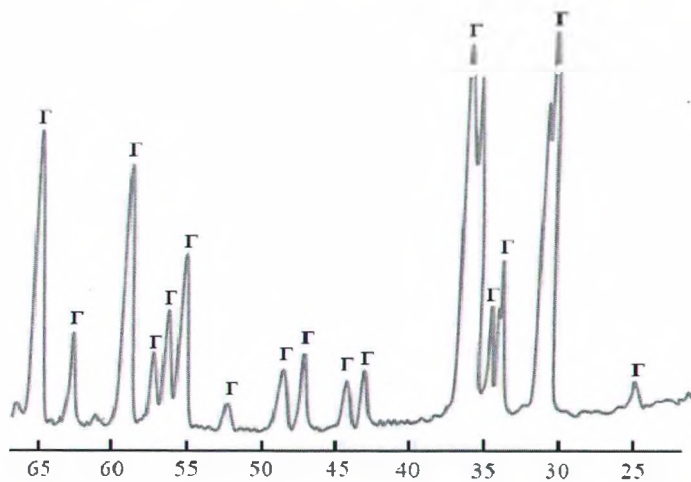


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма синтезированного ганита (Γ) ZnAl_2O_4
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of the synthesized ganite ZnAl_2O_4

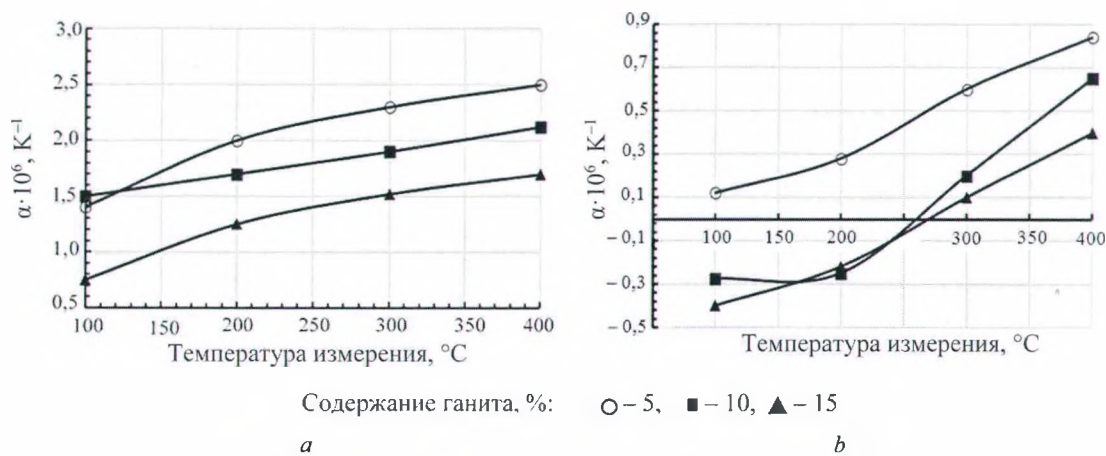


Рис. 3. Температурная зависимость ТКЛР образцов, обожженных при температурах 1 150 °C (*a*) и 1 200 °C (*b*)
Fig. 3. Temperature dependence of LTEC of samples synthesized at 1 150 °C (*a*) and 1 200 °C (*b*) temperatures

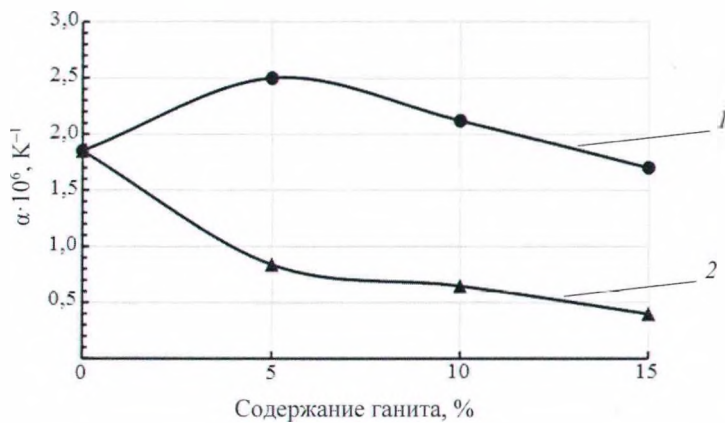


Рис. 4. Зависимость ТКЛР образцов, обожженных при температурах 1 150 °C (1) и 1 200 °C (2), от содержания ганита ZnAl_2O_4
Fig. 4. Dependence of the LTEC of samples burned at 1 150 °C (1) and 1 200 °C (2) temperatures on the content of ganite ZnAl_2O_4

5 % в образцах, синтезированных при 1 200 °С, наблюдается снижение ТКЛР до $0,85 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ по сравнению с исходным образцом, не содержащим ганита и характеризующимся ТКЛР $1,84 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Дальнейшее увеличение содержания ганита в образцах приводит к более плавному понижению ТКЛР. Образец керамики, содержащий 15 % ZnAl_2O_4 , характеризуется значением ТКЛР, равным $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, и может быть рекомендован в качестве оптимального.

Сравнительный анализ результатов исследования влияния оксида цинка и предварительно синтезированного ZnAl_2O_4 на термическое расширение синтезированных материалов позволил установить, что минерализирующее действие оксида цинка более эффективно по сравнению с ганитом. Образцы, полученные при температуре 1 150 °С на основе состава $1/4$ и содержащие 4 % ZnO , характеризуются отрицательным значением ТКЛР ($-0,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Можно предположить, что при использовании оксида цинка происходит более легкое встраивание катиона цинка вместо Mg^{2+} в решетку высокорасширяющегося форстерита, снижая его ТКЛР, а при введении ZnO ганитом этот процесс затрудняется, поскольку цинк уже связан в кристаллической решетке ZnAl_2O_4 .

Согласно данным рентгенофазового анализа при температуре 1 200 °С в образцах, содержащих 15 % ZnAl_2O_4 , формируются следующие кристаллические фазы: шпинель типа $(\text{Mg}, \text{Zn})\text{Al}_2\text{O}_4$, сподумен $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, сапфирин $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{SiO}_{10}$, форстерит $\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)$ и корунд Al_2O_3 (рис. 5).

При сравнении фазового состава керамики, модифицированной ZnO , с фазовым составом керамики, синтезированной с использованием ганита, установлено, что во втором случае образуется новая кристаллическая фаза – сапфирин. По данным А. С. Поваренных, сапфирин структурно близок к шпинелидам. Центры атомов кислорода располагаются по закону плотнейшей кубической упаковки, Si и Al находятся в четверной, а атомы Mg – в шестерной координации. Нормальный сапфирин имеет неупорядоченную структуру. К разновидностям относятся Fe-сапфирин, где ион Fe^{2+} замещает ион Mg^{2+} в соотношении $\text{Mg} : \text{Fe} = 3 : 1$, а ион Fe^{3+} в небольшом количестве замещает Al^{3+} . Плотность сапфирина составляет 3 400 кг/м³, твердость по Моосу – 7,5, ТКЛР – $8,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [8].

По-видимому, сочетание вышеприведенных кристаллических фаз обуславливает полученные показатели ТКЛР.

Сравнительный анализ результатов исследований, приведенных в табл. 2, показал, что из технологических приемов получения термостойкой керамики наиболее целесообразен прямой при замене 4 % оксида магния, вводимого тальком, эквивалентным количеством оксида цинка.

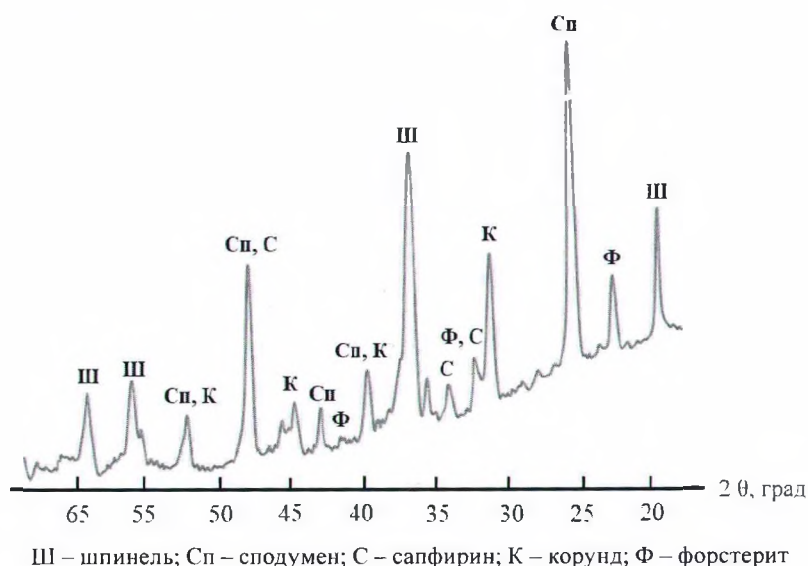


Рис. 5. Рентгеновская дифрактограмма образцов, содержащих 15 % ганита ($T_{\text{обж.}} = 1\,200\text{ °C}$)

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of samples containing 15% ganite ($T_{\text{burn.}} = 1\,200\text{ °C}$)

Таблица 2. Основные характеристики и свойства керамики оптимального состава
Table 2. Main characteristics and properties of ceramics of optimal composition

Основные характеристики и свойства	Технологический прием синтеза	
	Прямой с использованием оксида цинка в количестве 4 %	С использованием предварительно синтезированного ганита в количестве 15 %
Температура спекания, °С	1 150	1 200
Фазовый состав	Сподумен, шпинель, форстерит, корунд, ганит, кварц	Сподумен, шпинель, форстерит, корунд, сапфирин
ТКЛР, $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	–0,25	0,4
Водопоглощение, %	15,0	20,7
Пористость открытая, %	32,3	34,6
Плотность кажущаяся, кг/м ³	1 835	1 810
Термостойкость, циклов	Более 80	Более 80
Механическая прочность при сжатии, МПа	300	265

Заключение. В результате проведенных исследований изучено влияние замещения оксида магния на оксид цинка в системе $Li_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2$, а также введения предварительно синтезированного ганита $ZnAl_2O_4$ на процессы спекания, фазообразования и термическое расширение синтезированных материалов.

Показано, что из технологических приемов получения термостойких материалов наиболее целесообразен синтез, при котором в состав керамической массы вводилось 4 % оксида ZnO взамен MgO . При этом подходе отсутствуют энергозатраты, связанные с предварительным синтезом и диспергированием ганита, формируется более плотный материал (открытая пористость до 32,3 %, кажущаяся плотность – не менее 1 835 кг/м³) с низкими значениями ТКЛР ($-0,25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), фазовый состав которого представлен сочетанием кристаллических фаз сподумена, шпинели, форстерита, корунда, ганита и кварца, что в совокупности обуславливает необходимые механические и термические характеристики изделий.

Список использованных источников

1. Cordierite obtained from compositions containing kaolin waste, talc and magnesium oxide / E. P. De Almeida [et al.] // *Ceram. Int.* – 2018. – Vol. 44, № 2. – P. 1719–1725. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.102>

2. Prospects for using clayey raw materials of the Krupetskii Sad deposit for producing heat-resistant ceramic products / R. Y. Popov [et al.] // *Glass Ceram.* – 2022. – Vol. 78, № 9. – P. 362–368. <https://doi.org/10.1007/s10717-022-00412-5>

3. The influence of different additives on microstructure and mechanical properties of aluminum titanate ceramics / W. Chen [et al.] // *Ceram. Int.* – 2021. – Vol. 47, № 1. – P. 1169–1176. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.234>

4. Crystallization and sintering studies on an anomalous $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ glass for making tunable thermal expansion ceramic / C. Venkateswaran [et al.] // *Int. J. Appl. Glass Sci.* – 2022. – Vol. 13, № 1. – P. 41–53. <https://doi.org/10.1111/ijag.15917>

5. Бобкова, Н. М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / Н. М. Бобкова. – Минск: Выс. шк., 2007. – 301 с.

6. Ultrahigh hardness $Li_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ glass-ceramics containing multiphase nanocrystals / L. Chen [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2022. – Vol. 105, № 12. – P. 7614–7624. <https://doi.org/10.1111/jace.18689>

7. Zhang, Y. MgO -doping in the $Li_2O-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$ glass-ceramics for better sealing with steel / Y. Zhang [et al.] // *J. Non-Cryst. Solids.* – 2014. – Vol. 405. – P. 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.09.022>

8. Исследование влияния оксидных добавок на свойства жаростойкого стеклокристаллического покрытия / Г. А. Малинина [и др.] // *Тр. ВИАМ.* – 2021. – № 5 (99). – С. 87–95.

References

1. De Almeida E. P., de Brito I. P., Ferreira H. C., de Lucena Lira H., de Lima Santana L. N., de Araújo Neves G. Cordierite obtained from compositions containing kaolin waste, talc and magnesium oxide. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 2, pp. 1719–1725. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.102>

2. Popov R. Y., Gula I. R., Dyatlova E. M., Shimanskaya A. N., Bogdan E. O., Kulish I. A. Prospects for using clayey raw materials of the Krupetskii Sad deposit for producing heat-resistant ceramic products. *Glass and Ceramics*, 2022, vol. 78, no. 9, pp. 362–368. <https://doi.org/10.1007/s10717-022-00412-5>

3. Chen W., Anze Shui, Qingliang Shan, Jiawei Lian, Cong Wang, Jianqiao Li. The influence of different additives on microstructure and mechanical properties of aluminum titanate ceramics. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 1, pp. 1169–1176. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.234>

4. Venkateswaran C., Sreemoolanadhan H. I., Pant B., Sharma S. C., Chauhan V. S., Vaish R. Crystallization and sintering studies on an anomalous $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass for making tunable thermal expansion ceramic. *International Journal of Applied Glass Science*, 2022, vol. 13, no.1, pp. 41–53. <https://doi.org/10.1111/ijag.15917>

5. Bobkova N. M. *Physical chemistry of refractory non-metallic and silicate materials*. Minsk, Vyshaya shkola Publ., 2007. 301 p. (in Russian).

6. Chen L., Sun T., Hao Z., Xie J., Zhang J., Han J., Wang M., Cui X., Liang, X. Ultrahigh hardness $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass–ceramics containing multiphase nanocrystals. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, vol. 105, no. 12, pp. 7614–7624. <https://doi.org/10.1111/jace.18689>

7. Zhang Y., Luo Z., Liu T., Hao X., Li Z., Lu A. MgO-doping in the $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glass-ceramics for better sealing with steel. *Journal of non-crystalline solids*, 2014, vol. 405, pp. 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.09.022>

8. Investigation of the effect of oxide additives on the properties of heat-resistant glass-crystal coating. *Trudy VIAM (Vserossiiskogo instituta aviatsionnykh materialov) = Proceedings of VIAM (All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials)*, 2021, vol. 5, no. 99, pp. 87–95 (in Russian).

Информация об авторах

Попов Ростислав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rospopov@mail.ru

Богдан Екатерина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Bohdan_Ekaterina@mail.ru

Сергиевич Ольга Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: topochka.83@mail.ru

Дятлова Евгения Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyatlova@belstu.by

Information about the authors

Popov Rostislav Yu. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rospopov@mail.ru

Bogdan Ekaterina O. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department. Belarusian State Technological University. (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Bohdan_Ekaterina@mail.ru

Sergieevich Olga A. – Ph. D. (Engineering). Senior Lecturer of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: topochka.83@mail.ru

Dyatlova Evgeniya M. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyatlova@belstu.by