

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 151–161.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 151–161.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161

EDN: PUDLRT

СТЕКЛОКЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ШПИНЕЛИ $MgAl_2O_4$, ПОЛУЧЕННАЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ПЛАВКИ

Валентин Валерьевич Шеховцов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования и применения стеклокерамических материалов на основе шпинели ($MgAl_2O_4$) обусловлена такими ее уникальными свойствами, как прочность, термостойкость, высокая теплопроводность. Эти свойства делают шпинель востребованным материалом для создания высокотехнологичных изделий и покрытий.

Цель настоящей работы: исследование возможности синтеза стеклокерамики на основе $MgAl_2O_4$ с содержанием диоксида кремния от 10 до 50 масс. %.

Для получения стеклокерамических образцов использовался метод плазменной плавки компонентных шихт при мощности электродугового плазмотрона 10 кВт и времени плавления 90 с. Полученные образцы исследовались методами РФА, EDX, ИКФС, СЭМ.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований получения стеклокерамики на основе шпинели с содержанием диоксида кремния от 10 до 50 масс. %.

Установлено, что при введении SiO_2 не более 20 масс. % в шихту со стехиометрическим составом шпинели не наблюдается фазовых превращений с образованием бинарных соединений типа $2MgO \cdot SiO_2$, $MgO \cdot SiO_2$, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. С увеличением SiO_2 от 30 до 50 масс. % влияние SiO_2 является существенным, в структурной матрице материала формируется квазиаморфная фаза. При этом в образце с содержанием SiO_2 30 масс. % прослеживаются слабые пики стехиометрической кристаллической фазы $MgAl_2O_4$ при $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$. Образцы с содержанием SiO_2 от 40 до 50 масс. % являются рентгеноаморфными. Для последних установлена тенденция к сужению диффузионного гало за счет доминанции ионов Si^{4+} при формировании решетки. Данное явление также подтверждается результатами ИКФС.

По результатам СЭМ описан процесс растворения кристаллической фазы $MgAl_2O_4$.

Установлено, что при содержании 30–40 масс. % SiO_2 растворение кристаллической фазы шпинели сопровождается образованием локальных областей с обогащением Mg и Al, т. е. происходит дифференциация в конденсированной фазе.

Полученные результаты могут быть интересны для разработки теплозащитных материалов, катализаторов, материалов электронной техники, а также для других отраслей промышленности, где требуется высокотехнологичная керамика.

Ключевые слова: шпинель, диоксид кремния, стеклокерамика, фазовые превращения, морфология

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2023-0003 и гранта Президента МК-66.2022.4.

Для цитирования: Шеховцов В.В. Стеклокерамика на основе шпинели MgAl_2O_4 , полученная методом плазменной плавки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 151–161. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161. EDN: PUDLRT

ORIGINAL ARTICLE

MgAl_2O_4 -BASED GLASS CERAMICS SYNTHESIZED BY THERMAL PLASMA MELTING

Valentin V. Shekhovtsov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of research and application of glass-ceramic materials based on spinel (MgAl_2O_4) is due to its unique properties such as strength, heat resistance, and high thermal conductivity. These properties make spinel a popular material for creating hi-tech products and coatings.

The paper presents the experimental results of the production spinel-based glass ceramics with the silicon dioxide content 10 to 50 wt.%. Thermal plasma melting is used obtain glass-ceramic samples, at 10 kW power and 90 s melting time. The obtained samples are studied by XRF, EDX, IRFS, SEM methods.

It is shown that the introduction of SiO_2 in the amount of not over 20 wt.% into the mixture with stoichiometric spinel, phase transformations with the formation of binary $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ compounds do not occur. With increasing SiO_2 content from 30 to 50 wt.%, the effect from SiO_2 is significant, a quasi-amorphous phase appears in the material matrix. At the same time, the SiO_2 content of 30 wt.% provides weak intensity of the stoichiometric crystalline phase MgAl_2O_4 at $2\theta = 36.6, 44.7, 59.3, 65.4$ degrees. Samples with the SiO_2 content 40 to 50 wt.% are X-ray amorphous. In this case, the diffusion halo narrows due to the dominance of Si^{4+} during the lattice formation. This phenomenon is also confirmed by IRFS results.

Based on SEM observations, a complete dissolution of the MgAl_2O_4 crystalline phase occurs. When the content of SiO_2 is 30 to 40 wt.%, dissolution of the spinel crystalline phase is accompanied by the formation of local regions rich in Mg and Al, i.e., differentiation proceeds in the condensed phase.

The research results will be of interest for the development of heat-shielding materials, and can be used for the catalyst development, in electronics and other industries producing hi-tech ceramics.

Keywords: spinel, silicon dioxide, glass ceramics, phase transformation, morphology

Funding: this work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEMN-2023-0003) and Grant N MK-66.2022.4 from the President of the Russian Federation.

For citation: Shekhovtsov V.V. $MgAl_2O_4$ -based glass ceramics synthesized by thermal plasma melting. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 151–161. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161. EDN: PUDLRT

Введение

Стеклокерамика (стеклокристаллические материалы) занимает особое место в производстве объёмных композиционных керамических материалов традиционного класса и в высокотехнологических областях техники [1, 2, 3]. Несмотря на широкое применение стеклокристаллических материалов, производство их до сих пор является сложной научной проблемой. Кристаллизация стеклокристаллических материалов – это неравновесный процесс, который делает производство очень сложным и дорогостоящим. Кроме того, кристаллизованные образцы могут иметь неравномерную структуру, что ухудшает их свойства.

Особым видом стеклокерамики являются оптически прозрачные материалы на основе специальных соединений, таких как шпинель [4, 5, 6]. Такая керамика широко используется в электронике, оптике, медицине и при изучении физико-химических процессов, протекающих в материалах. В последние годы предложено несколько способов создания оптически прозрачной керамики [7, 8, 9]. Шпинель ($MgAl_2O_4$) относится к группе кристаллов, имеющих высокую термическую стабильность, твердость и диэлектрическую прозрачность. Оптически прозрачные керамические материалы на основе $MgAl_2O_4$ могут применяться в качестве заменителя стекла и пластика в различных приложениях.

В современной промышленности использование термической плазмы в процессе плавления имеет большую перспективу в связи с рядом преимуществ этой технологии. Во-первых, термическая плазма позволяет достичь высоких температур (среднемассовая температура 6000 K), что обеспечивает получение расплавов из очень сложных и тугоплавких материалов. Во-вторых, возможно получение высоких скоростей нагрева, что позволяет производить расплавы с определенными свойствами (например, повышенной степенью кристаллизации). В-третьих, термическая плазма является эффективным инструментом для обработки различных материалов и отходов, который обеспечивает экологическую устойчивость технологий производства. Наконец, применение термической плазмы позволяет получать расплавы с определенными химическими и физическими свойствами, что может быть полезно для различных отраслей промышленности, таких как металлургия, химическая, электронная и др.

Целью настоящей работы является исследование возможности синтеза стеклокерамики на основе $MgAl_2O_4$ с содержанием диоксида кремния от 10 до 50 масс. %.

Материалы, эксперимент и методы исследования

В качестве источника оксида магния (MgO), оксида алюминия (Al_2O_3) и диоксида кремния (SiO_2) применялись распространенные природные сырьевые материалы: магнезит, бёмит и кварцевый песок соответственно перечисленным оксидам. В таблице представлен усредненный оксидный состав используемых материалов.

Оксидный состав материалов

Oxide content

Материал	Содержание, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Δm _{прк}
Магнезит	1,60	0,59	0,80	0,85	48,39	0,05	50,26
Бёмит	0,03	99,0	0,02	—	—	—	0,9
Кварцевый песок	98,15	0,67	0,09	0,07	0,02	—	0,94

Стоит отметить, что каждый вид сырья и материалы на их основе, полученные с использованием энергии термической плазмы, ранее исследовались с применением полного комплекса физико-химических методов [10–13]. Например, в работах [10, 11] проведен анализ структурно-фазовых изменений кварцевого песка, магнезита и продуктов плавления на их основе. Согласно [12], источник оксида алюминия (бёмит) неплохо зарекомендовал себя при синтезе муллитов. В работе [13] показана возможность синтеза алюмомагнезиальной шпинели высокой чистоты с применением электродуговой плавки компонентов. Однако влияние SiO₂ на процесс растворения шпинели в бинарной системе MgO-Al₂O₃ не исследовалось, что подтверждается отсутствием научных работ в периодической литературе.

На рис. 1, а представлена часть тройной диаграммы состояния MgO-Al₂O₃-SiO₂, где отмечены приготовленные составы шихт, которым присвоен шифр (SP-1, SP-2 и т. д.). Порядковый номер соответствует количеству вводимого диоксида кремния относительно стехиометрического состава шпинели. Например, индекс 1 соответствует 10 масс. % диоксида кремния в шихте.

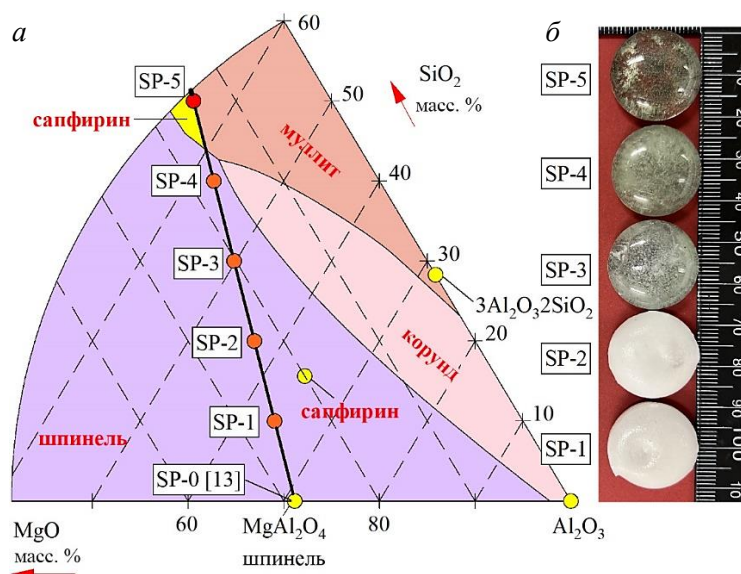


Рис. 1. Участок диаграммы состояния MgO-Al₂O₃-SiO₂ с указанием экспериментальных составов (а); фотография полученных образцов (б)

Fig. 1. Ternary phase diagram of MgO-Al₂O₃-SiO₂ with experimental compositions (а); photograph of synthesized samples (б)

Экспериментальные исследования проводились на электроплазменном стенде [10–13], в основу которого положено использование энергии термической плазмы для плавления твердофазных материалов. Плавление проходило в графитовом тигле высотой 60 мм и диаметром 25 мм. Масса засыпки составляла 10 г. Образцы синтезировались при мощности 12 кВт в течение 90 с. На рис. 1, б показана фотография полученных образцов.

Рентгеноструктурные исследования проведены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с использованием медного излучения (K_α), фокусировки по Брэггу – Брентано с шагом 0,02, времени экспозиции в точке 0,5 с и углового диапазона 10–90°. Оценка морфологии синтезируемых образцов выполнена на сканирующем электронно-ионном микроскопе FEI Quanta 200 3D (30 кВ).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа продуктов плавления, полученных из исследуемых составов. Установлено, что в образцах SP-1 и SP-2, где содержание SiO_2 не превышает 20 масс. %, фазовых образований не протекает, бинарные соединения типа $2MgO \cdot SiO_2$, $MgO \cdot SiO_2$, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ не установлены. Это объясняется высокой скоростью кристаллизации $MgAl_2O_4$ в системе $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ ввиду того, что $MgAl_2O_4$ имеет наивысшую точку конгруэнтной температуры плавления 2135 °С.

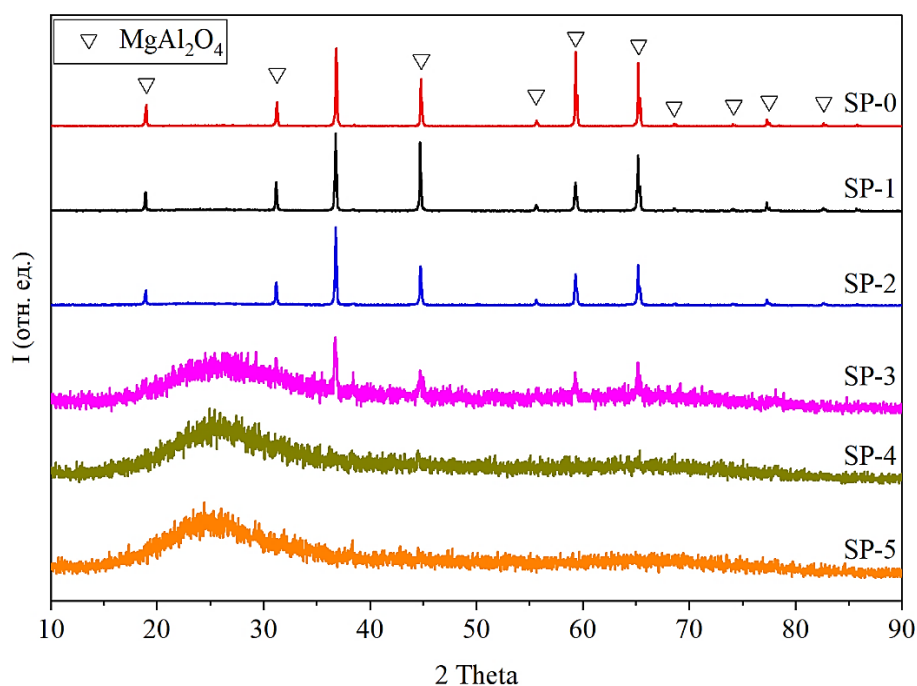


Рис. 2. Экспериментальные дифрактограммы синтезируемых образцов в среде термической плазмы

Fig. 2. XRD patterns of samples synthesized by thermal plasma melting

Когда содержание SiO_2 увеличивается с 30 до 50 масс. %, в структурной матрице материала формируется квазиаморфная фаза. При этом в образце SP-3 прослеживаются слабые интенсивности стехиометрической кристаллической фазы MgAl_2O_4 при $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$. Образцы SP-4 и SP-5 состоят из квазиаморфной фазы, и методом рентгенофазового анализа невозможно определить количество растворенной MgAl_2O_4 в составе синтезируемых образцов. Стоит отметить, что с увеличением содержания SiO_2 диффузионное гало стремится к сужению и показывает доминацию ионов Si^{4+} при формировании решетки.

На рис. 3 представлены результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии синтезируемых образцов.

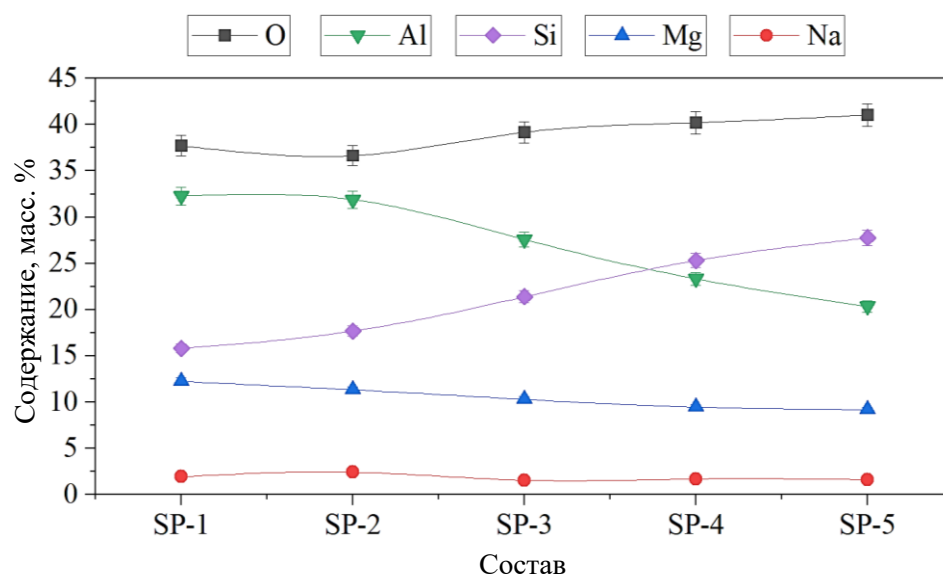


Рис. 3. Результаты энергодисперсионного анализа синтезируемых образцов
Fig. 3. EDX results of synthesized samples

Согласно полученным результатам, в образцах SP-1 и SP-2 состав матрицы имеет линейную тенденцию, отклонение содержания элементов находится на уровне 2 %. В пределах составов образцов SP-3 и SP-4 просматривается переходная область, свидетельствующая о деструкции кристаллической шпинели. Далее влияние ионов Si^{4+} на формирование полной объемной матрицы существенно растет, что согласуется со снижением содержания Al и Mg. Наличие атомов Na обосновано введением в шихту силиката натрия (Na_2SiO_3) в качестве водного раствора. Однако его концентрация не превышает 2 масс. % и не меняется во всем диапазоне рассматриваемых составов. Таким образом, его вклад в формирование структурной матрицы синтезируемых материалов незначителен.

Для того чтобы уточнить взаимосвязь межмолекулярных взаимодействий SiO_2 и MgAl_2O_4 , проведена инфракрасная спектроскопия образцов SP-3, SP-4 и SP-5. Зарегистрированы ИК-Фурье спектры в диапазоне $370\text{--}1500\text{ см}^{-1}$

с помощью спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (приставка «Алмаз на КРС-5», спектрометр Tensor 27), $D = 4\text{ см}^{-1}$, 128 накоплений, сохранены исходные данные, а также проведена стандартная математическая обработка лучших из полученных спектров, для которых применена атмосферная компенсация CO_2 и H_2O , вычтена базовая линия. Приведенные спектры нормированы для упрощения сравнения полученных данных (рис. 4).

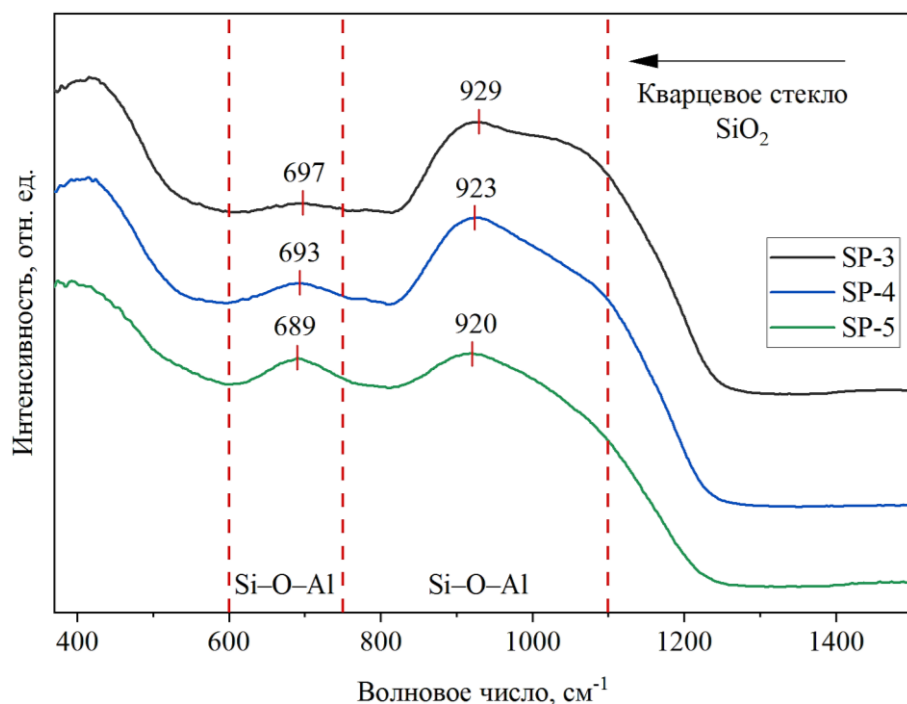


Рис. 4. ИК-спектры синтезируемых образцов
Fig. 4. IR spectra of synthesized samples

Согласно исследованиям, введение SiO_2 в $MgAl_2O_4$ приводит к изменению связей Si-O-Si, Al-O-Al и Si-O-Al. При добавлении SiO_2 в $MgAl_2O_4$ происходит образование новых связей между атомами Si и Al, что ведет к появлению дополнительных кислородных связей в кристаллической структуре материала. Однако при высокой концентрации SiO_2 возникают проблемы со стабильностью кристаллической структуры, что согласуется с результатами РФА (см. рис. 2). Излишняя концентрация Si в шпинели приводит к изолированию SiO_4 тетраэдров. Отсутствие ярко выраженных валентных полос, связанных с Si-O-Si, обусловлено увеличением среднего расстояния между (Si, Al)-O и упорядочением каркасной сетки через ее аморфизацию.

На рис. 5 представлены электронные снимки скола поверхности синтезируемых продуктов в среде термической плазмы. Первоначальный анализ снимков указывает на наличие двух видов разрушения: при содержании $SiO_2 \geq 20$ масс. % разрушение интеркристаллитное; при содержании $30 \leq SiO_2 \leq 50$ масс. % – транскристаллитное.

С точки зрения формирования морфологических признаков объемной матрицы в образце SP-1, как и положено, формируются октаэдрические кристаллы размером от 10 до 60 мкм [13]. В некоторых областях между границами разделов кристаллов наблюдается однородная связка (гомогенная по структурному признаку), но данные области отличаются от состава стехиометрической шпинели (присутствуют следы SiO_2). Однако её вклад в формирование всей матрицы материала минимален, в большей степени присутствует плотная упаковка октаэдрических кристаллов MgAl_2O_4 .

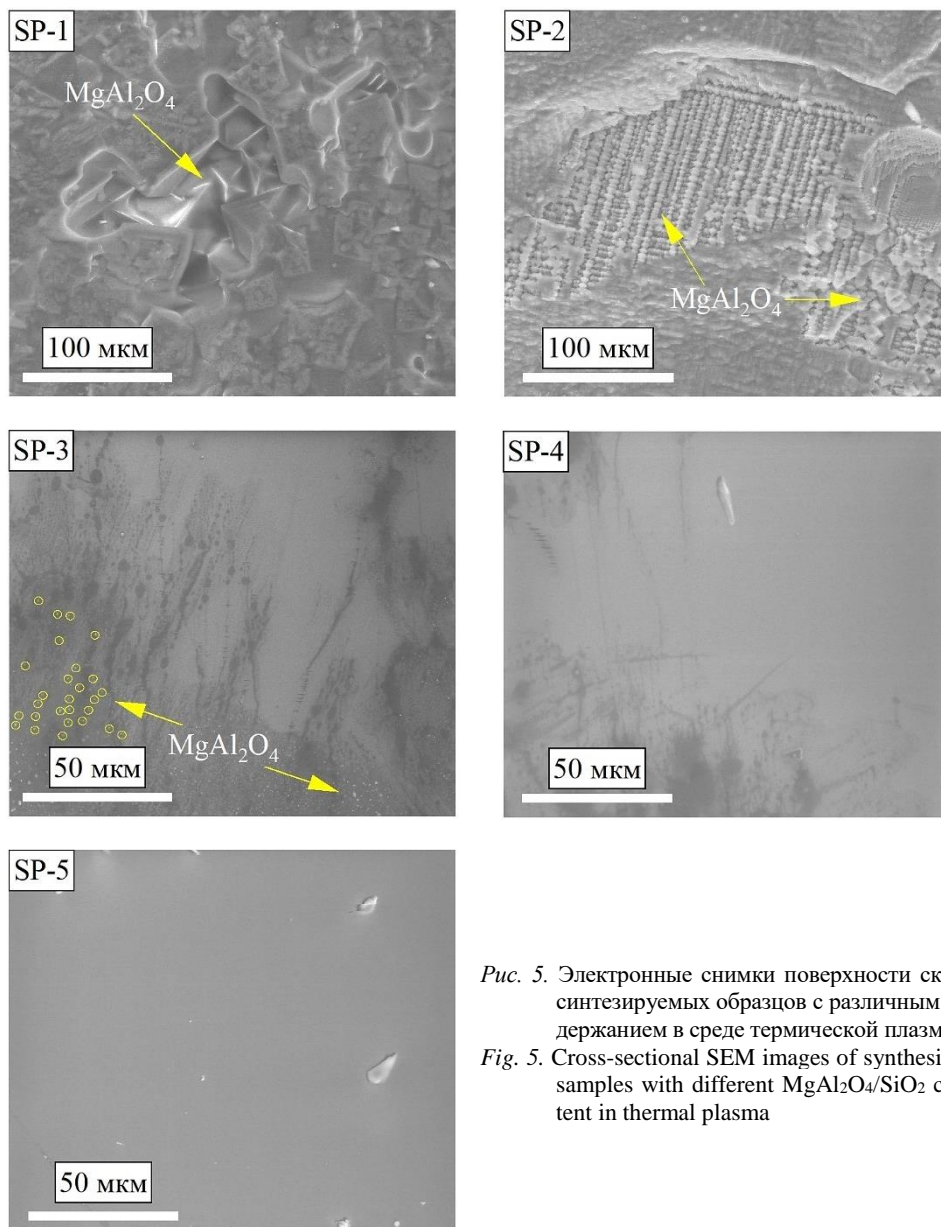


Рис. 5. Электронные снимки поверхности скола синтезируемых образцов с различным содержанием в среде термической плазмы
Fig. 5. Cross-sectional SEM images of synthesized samples with different $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ content in thermal plasma

В образце SP-2 наблюдается уменьшение размеров октаэдрических кристаллов $MgAl_2O_4$ вплоть до микронных и субмикронных благодаря поверхностному диффузионному перемешиванию атомов шпинели при контакте с локальными областями жидкой фазы, представленной SiO_2 . Это находит своё подтверждение с постепенным увеличением содержания SiO_2 в образце SP-3, т. к. в нем просматриваются субмикронные включения кристаллической фазы $MgAl_2O_4$ (отмечены желтыми областями на рис. 5), что согласуется и с результатами рентгенофазового анализа (см. рис. 2). Стоит отметить, что содержание SiO_2 в пределах 30–40 масс. % обеспечивает растворение кристаллической фазы шпинели, которое сопровождается образованием локальных областей с обогащением Mg и Al, т. е. дифференциация протекает в конденсированной фазе. Разделение по структурному фактору в матрице образца SP-5 не прослеживается. Это достигается полным растворением кристаллов шпинели, что ведет к образованию единого материала без наглядного присутствия кристаллических фаз, т. е. кристаллы шпинели разрушаются, и ионы Mg^{2+} и Al^{3+} внедряются в сформированную квазиаморфную матрицу, замещая ионы Si^{4+} . Кроме того, атомы кислорода из шпинели могут переходить в стекло (аморфное состояние, при котором структура материала не имеет дальнего порядка) и образовывать дополнительные связи аморфных силикатов.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность использования энергии термической плазмы для синтеза стеклокерамики на основе шпинели $MgAl_2O_4$ с содержанием диоксида кремния до 50 масс. %. Установлена зависимость влияния концентрации диоксида кремния на структуру и фазовый состав стеклокерамического материала на основе кристаллической фазы шпинели. С увеличением SiO_2 от 30 до 50 масс. % его влияние растёт, формируется квазиаморфная фаза в структурной матрице материала. При этом в образце с содержанием 30 масс. % SiO_2 прослеживаются слабые интенсивности стехиометрической кристаллической фазы $MgAl_2O_4$ при $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$. Образцы с содержанием от 40 до 50 масс. % SiO_2 являются рентгеноаморфными. Для рентгеноаморфных образцов установлена тенденция сужения диффузионного гало за счет доминанции ионов Si^{4+} при формировании решетки. Данное явление также подтверждается результатами инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье.

Таким образом, исследование, представленное в статье, подтверждает перспективность использования метода плазменной плавки для получения новых стеклокерамических материалов на основе шпинели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вандрай С.Н., Зайчук Т.В., Устинова Ю.С. и др. Кордиеритовая стеклокерамика для изделий радиотехнического назначения // Стекло и керамика. 2019. № 9. С. 17–23.
2. Лесников А.К., Лесников П.А., Тюрина З.Г. Стеклокерамика на основе диоксида кремния, как перспективный материал для использования в атомной энергетике // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48. № 4. С. 428–450.
3. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щеголева Н.Е. и др. Радиопрозрачная стеклокерамика на основе стронцийалюмосиликатного стекла // Огнеупоры и техническая керамика. 2016. № 6. С. 31–37.

4. Колобкова Е.В., Полякова А.В., Абдршин А.Н. и др. Наноструктурированная стеклокерамика на основе фторофосфатных стекол с квантовыми точками PbSe // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. № 1. С. 173–177.
5. Dan Han, Jian Zhang, Peng Liu, Gui Li, Liqiong An, Shiwei Wang. Preparation of high-quality transparent Al-rich spinel ceramics by reactive sintering // *Ceram. Int.* 2018. № 44 (3). P. 3189–3194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.089>
6. Waetzig K., Krell A. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich MgO·nAl₂O₃ spinel ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* 2016. № 99 (3). P. 946–953.
7. Khomidov F.G., Kadyrova Z.R., Usmanov K.L. et al. Peculiarities of sol-gel synthesis of aluminum-magnesium spinel // *Glass Ceram.* 2021. № 78. P. 251–254.
8. Vojtěch Nečina, Willi Pabst. Comparison of the effect of different alkali halides on the preparation of transparent MgAl₂O₄ spinel ceramics via spark plasma sintering (SPS) // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2020. № 40 (15). P. 6043–6052.
9. Pappas J.M., Thakur A.R., Kinzel E.C., Dong X. Direct 3D printing of transparent magnesium aluminate spinel ceramics // *J. Laser Appl.* 2020. № 33 (1). P. 012018.
10. Abzaev Y.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K. et al. Investigation of the melting of quartz sand by low-temperature plasma // *Glass Ceram.* 2015. № 72 (5–6) P. 225–227.
11. Шеховцов В.В., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г. и др. Особенности структурно-фазового состояния природного магнезита MgCO₃ в диапазоне температур 1173–6500 К // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 7 (776). С. 73–78.
12. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Гафаров Р.Е. Синтез муллитсодержащей керамики в среде низкотемпературной плазмы // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48. № 5. С. 630–634.
13. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б. Синтез алюмомагнезимальной керамики MgAl₂O₃ в среде термической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 138–146.

REFERENCES

1. Vandrai S.N., Zaichuk T.V., Ustinova Yu.S., et al. Cordierite glass ceramics for radiotechnical products. *Steklo i keramika*. 2019; (9): 17–23. (In Russian)
2. Lesnikov A.K., Lesnikov, P.A. Tyurnina Z.G. Glass ceramics based on silicon dioxide as a promising material for nuclear power industry. *Fizika i khimiya stekla*. 2022; 48 (4): 428–450. (In Russian)
3. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Shchegoleva N.E., et al. Radio-transparent glass-ceramic based on strontium-alumino-silicate glass. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2016; (6): 31–37. (In Russian)
4. Kolobkova E.V., Polyakova A.V., Abdrshin A.N., et al. Nanostructured glass ceramics based on fluorophosphate glasses with PbSe quantum dots. *Fizika i khimiya stekla*. 2015; 41 (1): 173–177. (In Russian)
5. Dan Han, Jian Zhang, Peng Liu, Gui Li, Liqiong An, Shiwei Wang. Preparation of high-quality transparent Al-rich spinel ceramics by reactive sintering. *Ceramics International*. 2018; 44 (3): 3189–3194. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.089>
6. Waetzig K., Krell A. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich MgO·nAl₂O₃ spinel ceramics. *American Ceramics Society*. 2016; 99 (3): 946–953.
7. Khomidov F.G., Kadyrova Z.R., Usmanov K.L., et al. Sol-gel synthesis of aluminum-magnesium spinel. *Glass Ceramics*. 2021; 78: 251–254. (In Russian)
8. Vojtěch Nečina, Willi Pabst. Comparison of the effect of different alkali halides on the preparation of transparent MgAl₂O₄ spinel ceramics via spark plasma sintering (SPS). *Journal of the European Ceramic Society*. 2020; 40 (15): 6043–6052.
9. Pappas J.M., Thakur A.R., Kinzel E.C., Dong X. Direct 3D printing of transparent magnesium aluminate spinel ceramics. *Journal of Laser Applications*. 2020; 33 (1): 012018.
10. Abzaev Y.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., et al. Investigation of the melting of quartz sand by low-temperature plasma. *Glass and Ceramics*. 2015; 72 (5–6): 225–227.
11. Shekhovtsov V.V., Abzaev Yu.A., Volokitin O.G., et al. Structure and phase composition of natural magnesite in 1173–6500 K temperature range. *Russian Physics Journal*. 2022; 65 (7): 1142–1148.

12. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Gafarov R.E. Synthesis of mullite-containing ceramics in a low-temperature plasma. *Glass Physics and Chemistry*. 2022; 48 (5): 440–443.
13. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Ulmasov A.B. Synthesis of aluminum-magnesian ceramics $MgAl_2O_3$ in thermal plasma environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 138–146. (In Russian)

Сведения об авторе

Шеховцов Валентин Валерьевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Author Details

Valentin V. Shekhovtsov, PhD, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2 Building 2, 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2023
Одобрена после рецензирования 05.06.2023
Принята к публикации 06.06.2023

Submitted for publication 22.05.2023
Approved after review 05.06.2023
Accepted for publication 06.06.2023