

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 1. С. 166–175.

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 (1): 166–175.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-166-175

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ФОРСТЕРИТОВОГО МАТЕРИАЛА

**Валентин Валерьевич Шеховцов, Нелли Карповна Скрипникова,
Олеся Анатольевна Кунц**

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

Аннотация. На сегодняшний день поиск новых методов синтеза форстеритовой керамики является актуальной задачей для огнеупорной промышленности. Сдерживающим фактором синтеза форстерита Mg_2SiO_4 является его высокая температура плавления $1890^\circ C$, что затрудняет возможность проведения экспериментальных исследований.

В настоящей работе предложен новый метод синтеза форстеритового материала, основанный на применении энергии термической плазмы. Источник плазмы рассматривается в контексте эффективной среды для нагрева и плавления тугоплавких материалов. В качестве исходных материалов для синтеза форстерита (Mg_2SiO_4) использовалось природное и некондиционное сырьё (отсев кварцевого песка, микрокремнезем, магнетит), при этом степень кристалличности варьируется от 10 до 98 %, что позволяет рассмотреть формирование фазового состава при различных параметрах.

По результатам рентгеновской порошковой дифрактометрии установлено, что при составе композиционных шихт $N = MgO/SiO_2$ со стехиометрическим соотношением $N = 1,34$ формируются продукты плавления с содержанием форстеритовой фазы Mg_2SiO_4 до 90 %. При этом присутствует рентгеноаморфная фаза, содержание которой варьируется от 5 до 12 %.

По результатам изотермической выдержки установлено, что аморфная фаза представлена диоксидом кремния SiO_2 в полиморфной модификации кристобалит. Методом сканирующей электронной микроскопии определено, что на поверхности керамического образца формируется плотная упаковка гексагональных кристаллов размером от 180 до 250 мкм. Состав кристаллов: O ~ 38,60, Mg ~ 28,54, Si ~ 26,92 масс. %, что согласуется с составом Mg_2SiO_4 . Детальный анализ одиночного кристалла показал, что структура поверхности выстраивается из группы игольчатых микрокристаллов, расположенных симметрично, но в то же время перекрывающих друг друга, тем самым образуя решетчатую структуру. Угол роста между микрокристаллами стремится к $\sim 87-94^\circ$, что указывает на строгое протекание процесса кристаллизации.

Ключевые слова: керамика, форстерит, фазовые превращения, микроструктура

Финансирование: работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001 и гранта Президента РФ МК-66.2022.4

Для цитирования: Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Кунц О.А. Плазменная технология синтеза форстеритового материала // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 1. С. 166–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-166-175.

ORIGINAL ARTICLE

THERMAL PLASMA SINTERING OF FORSTERITE CERAMICS

Valentin V. Shekhovtsov, Nelli K. Skripnikova, Olesya A. Kunts

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. To date, new synthesis methods of forsterite (Mg_2SiO_4) ceramics are being searched for refractory industry. The limiting factor of Mg_2SiO_4 synthesis is its high melting point of 1890 °C, which makes it difficult to conduct experimental studies.

The paper proposes a new method of forsterite synthesis based on thermal plasma. The plasma source is an effective medium for heating and melting refractory materials. For the Mg_2SiO_4 synthesis, such initial materials are used as natural and sub-standard raw materials (silica sand sifting, microsilica, magnesite). The degree of crystallinity varies from 10 to 98 %, which allows studying the formation of the phase composition at different parameters.

According to powder X-ray diffraction patterns, at a MgO/SiO_2 stoichiometric ratio of 1.34, the obtained melting products consist up to 90 % Mg_2SiO_4 and the X-ray amorphous phase content varies from 5 to 12 %. After isothermal exposure, the amorphous phase is represented by silicon dioxide in the polymorphic modification of cristobalite. According to scanning electron microscopy observations, the formation of hexagonal close-packed crystals occurs on the surface of the ceramic sample, with the size ranging from 180 to 250 μm . The elemental composition of the crystal consists of ~ 38.60 wt. % O, ~ 28.54 wt. % Mg, ~ 26.92 wt. % Si, which matches the theoretical composition of Mg_2SiO_4 . A detailed analysis of a single crystal shows that the surface structure consists of acicular microcrystals arranged symmetrically, but at the same time overlapping each other, thereby forming a lattice structure. The growth angle between the cubic microcrystals tends to ~87–94 degrees.

Keywords: ceramics, forsterite, phase transformation, microstructure

Funding: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEMN-2022-0001) and Grant N MK-66.2022.4 from the President of the Russian Federation.

For citation: Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Kunts O.A. Thermal plasma sintering of forsterite ceramics. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (1): 166–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-166-175.

Введение

Технологии получения многих современных функциональных материалов, таких, например, как форстерит, предъявляют повышенные требования к используемому порошковому сырью (чистота, соответствие стехиометрии, дисперсность и др.). Порошки должны иметь заданный фазовый состав и характеризоваться равномерным распределением компонентов и добавок. Для получения порошков, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям, широко применяют химические методы, которые не требуют механического дробления, грубого и среднего помола, приводящих к загрязнению материала. При этом данные методы позволяют получать порошки с размером частиц менее 1 мкм [1].

Благодаря высокому уровню физико-технических свойств форстеритовая керамика находит широкое применение в различных областях техники [2]. Форстерит является конечным минералом из ряда твердых растворов оливина, который содержит магний в своей структуре. Химическая формула форстерита

Mg_2SiO_4 . В природе форстерит встречается в виде твердого раствора оливина, имеющего химическую формулу $(Mg^{2+} Fe^{2+})_2[SiO_4]$ [3]. В промышленности форстерит используется как огнеупорный материал благодаря высокой огнеупорности до 1890 °С и огнеупорности под нагрузкой 1600 °С [4]. Еще одним важным свойством форстерита является его коэффициент линейного теплового расширения, который очень похож на коэффициент металлов при повышении температуры. По этой причине форстеритовая керамика широко применяется в электротехнике. Форстерит также может быть использован в качестве футеровки зоны спекания вращающейся печи для производства цемента или в качестве футеровки металлургических печей [5].

Форстерит можно синтезировать с использованием различных исходных материалов и методов. Для синтеза форстерита разработаны различные методы подготовки порошков, такие как соосаждение, золь-гель, твердофазная реакция, метод саморастекания и т. д. [6–9]. Но керамика, полученная на основе порошков, синтезированных указанными выше способами, всегда имеет некоторые ограничения по плотности и механической прочности, которые необходимы для материалов, применяемых в высокотемпературных условиях. По сравнению с упомянутыми выше методами, традиционный твердофазный реакционный процесс более прост и предпочтителен для крупномасштабного производства. Однако в процессе прокаливания образующийся $MgSiO_3$ (вторичная фаза) и остаточный MgO всегда приводят к низкой плотности, высокой пористости, плохой спекаемости и пр.

Целью настоящей работы является синтез форстеритового материала Mg_2SiO_4 на основе природного и некондиционного сырья с использованием энергии термической плазмы методом плавления в атмосферной среде.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований выбрана следующая группа материалов: источник MgO – магнезит Халиловского и Савинского месторождений; источник SiO_2 – микрокремнезем ОАО «Кузнецкие ферросплавы» и отсев кварцевого песка Туганского месторождения.

В таблице представлен оксидный состав выбранных материалов.

Оксидный состав материалов, масс. %
Oxide content, wt. %

Материал	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	R_2O_3	$\Delta m_{прк}$
Магнезит Халиловского месторождения	6,16	0,09	1,03	2,33	48,22	0,05	–	43,12
Магнезит Савинского месторождения	1,60	0,59	0,80	0,85	46,88	0,05	1,51	50,26
Микрокремнезем ОАО «Кузнецкие ферросплавы»	94,89	0,47	0,60	0,36	0,30	–	–	3,43
Отсев кварцевого песка Туганского месторождения	98,15	0,67	0,09	0,07	0,02	–	–	0,94

На первом этапе выбранные материалы проходили изотермическую выдержку в электропечи типа 6.7-1300 СНОЛ при 950 °С в течение 3 ч. Установлено, что потеря массы при прокаливании магнезита различного месторождения варьируется и составляет $49,5 \pm 9,1$ масс. %, что характерно для протекания изотермической реакции $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$. По отношению к магнезиту кварцевый песок и микрокремнезём являются более стабильными, потеря массы варьируется от 4 до 8 масс. %. На рис. 1 представлены типичные результаты рентгенофазового анализа материалов в исходном состоянии и после изотермической выдержки.

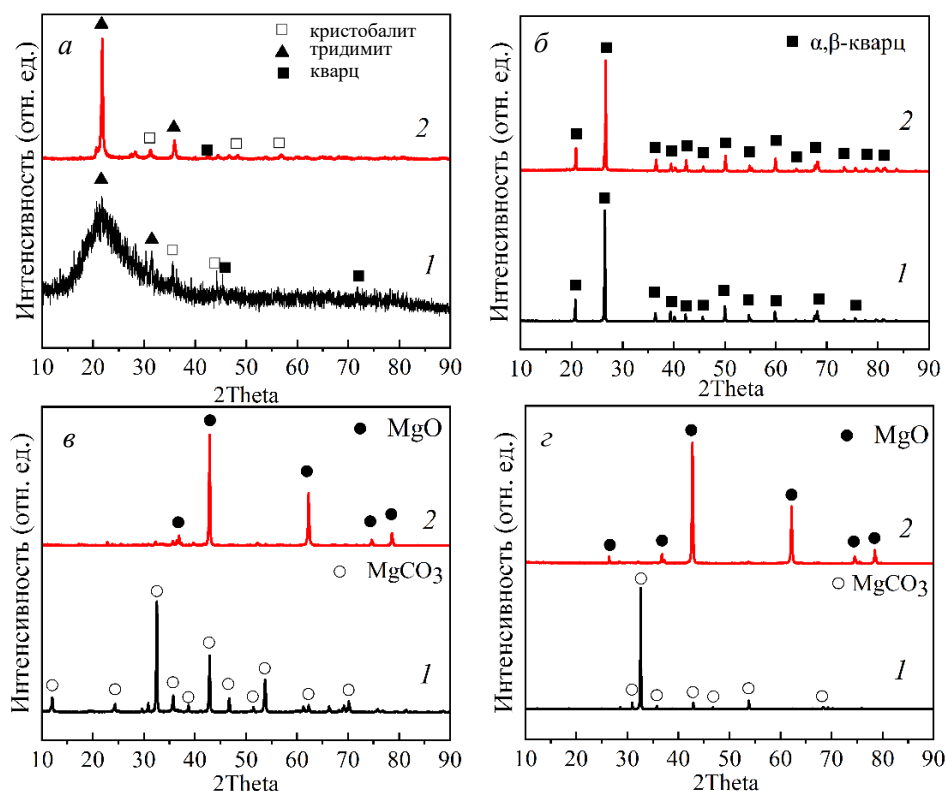


Рис. 1. Типичные рентгенограммы материалов в исходном (1) и прокаленном (2) состоянии: а – микрокремнезём ОАО «Кузнецкие ферросплавы»; б – отсев кварцевого песка, Туганское месторождение; в – магнезит Халиловского месторождения; з – магнезит Савинского месторождения

Fig. 1. Typical XRD patterns of materials before (1) and after (2) isothermal exposure: а – microsilica from ОАО “Kuznetskie ferrosplavy”; б – silica sand sifting from Tuganskoe deposit; в – magnesite from Khalilovskoe deposit; д – magnesite from Savinskoe deposit

Материалы, выступающие источником диоксида кремния (рис. 1, а, б), представлены различными модификациями SiO_2 . Стоит отметить, что отличительной чертой фазового состава микрокремнезёма является наличие рентгеноаморфного гало в диапазоне $2\theta = 15\text{--}40^\circ$. Аморфной составляющей, как показали результаты рентгенофазового анализа после изотермической выдерж-

ки, является основная кристаллическая фаза тридимит. Присутствуют слабо-интенсивные рефлексы фазы кристобалит. Исследуемый фазовый состав магнезита в исходном состоянии и после изотермической выдержки (рис. 1, в, г) показал наличие фазы MgO в обоих случаях. Полученные результаты согласуются с оксидным составом (таблица) и результатами исследований, показанных в работах [10–13].

После изотермической выдержки выбранных материалов подготовлены следующие компонентные составы в стехиометрическом соотношении $\text{MgO}/\text{SiO}_2 \sim 1,34$, согласно двухкомпонентной диаграмме состояния $\text{MgO}-\text{SiO}_2$:

F-1 – магнезит Халиловского месторождения/отсев кварцевого песка, Туганское месторождение;

F-2 – магнезит Халиловского месторождения/микрокремнезем;

F-3 – магнезит Савинского месторождения/отсев кварцевого песка, Туганское месторождение;

F-4 – магнезит Савинского месторождения/микрокремнезем.

Подготовленные составы перемешивались в планетарной шаровой мельнице (YXQM-2L) до гомогенного состояния. Затем полученная шихта гранулировалась до размера 3–5 мм с добавлением связующего, в качестве которого применялся водный раствор силиката натрия (Na_2SiO_3). Полученный гранулят сушился при температуре 30 °С в течение 24 ч, затем он использовался в процессе высокотемпературного плавления. Методика плавления гранулированных порошковых материалов описана в работах [14–17].

На рис. 2 представлены типичные рентгенограммы синтезированных образцов из различных материалов при стехиометрическом соотношении $\text{MgO}/\text{SiO}_2 \sim 1,34$.

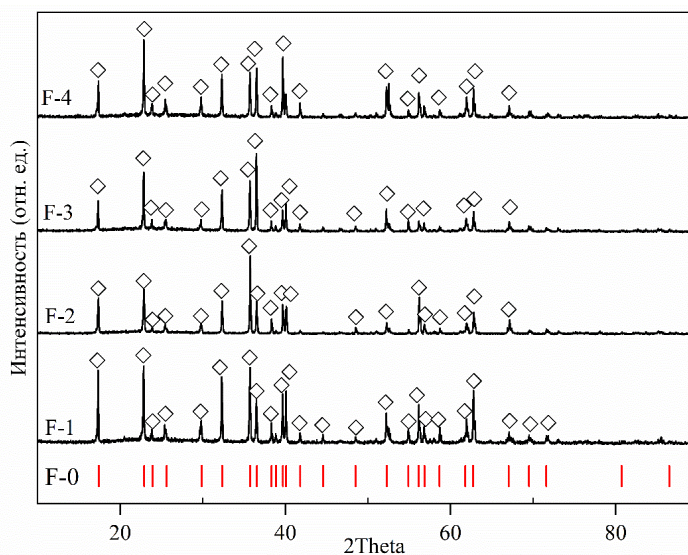


Рис. 2. Типичные рентгенограммы синтезированных образцов при стехиометрическом соотношении $\text{MgO}/\text{SiO}_2 \sim 1,34$ в среде термической плазмы

Fig. 2. Typical XRD patterns of plasma-synthesized powders at stoichiometric proportion $\text{MgO}/\text{SiO}_2 \sim 1.34$

Установлено, что синтезированные материалы соответствуют эталонной карточке RRUFF ID: R040018. Параметры решетки: $a = 0,476$ нм; $b = 1,022$ нм; $c = 0,599$ нм; ромбическая сингония. Во всех случаях присутствует рентгено-аморфная фаза в количестве от 5 до 12 %. Таким образом, для установления состава аморфной фазы произведена изотермическая выдержка с целью выкристаллизации аморфной фазы. На рис. 3 представлено сравнение участков рентгенограммы при $2\theta = 36\text{--}42$; $56\text{--}66$; $20\text{--}28$; $29\text{--}32^\circ$ для образца F-1 в исходном состоянии и после изотермической выдержки.

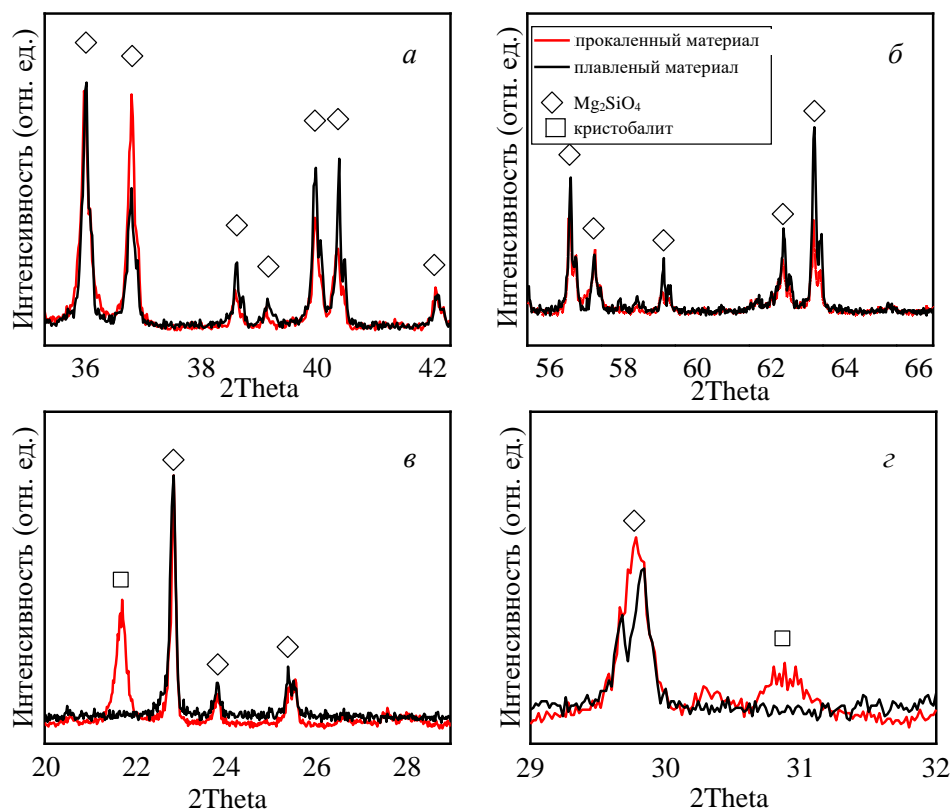


Рис. 3. Сравнение участков рентгенограмм образца F-1 в исходном состоянии и после изотермической выдержки

Fig. 3. XRD patterns of F-1 sample before and after isothermal exposure

Проведенная изотермическая выдержка показала, что основной долей кристаллической фазы ($\sim 90\%$) остался форстерит Mg_2SiO_4 , при этом прошла выкристаллизация диоксида кремния в полиморфной модификации кристобалит, это отчётливо видно на участках рентгенограммы при $2\theta = 20\text{--}28$; $29\text{--}32^\circ$. Таким образом, полученный материал в среде термической плазмы характеризуется высоким содержанием форстеритовой Mg_2SiO_4 и аморфной фазы, представленной диоксидом кремния SiO_2 в полиморфной модификации кристобалит.

На рис. 4 представлены результаты исследования морфологических особенностей поверхности синтезируемого образца F-1. По результатам сканиру-

ющей электронной микроскопии (рис. 4, а) установлено, что в процессе кристаллизации при интенсивном теплообмене с окружающей средой (скорость остывания 6,75 °C/с) формируется плотная упаковка гексагональных кристаллов. Размер кристаллов варьируется от 180 до 250 мкм. Детальный анализ одиночного кристалла (рис. 4, б) показал, что структура поверхности выстраивается из группы игольчатых микрокристаллов, расположенных симметрично, но в то же время перекрывающих друг друга, тем самым образуется сетчатая структура. Отметим, что угол роста между микрокристаллами стремится к ~87–94°, что указывает на строгое протекание процесса кристаллизации. На рис. 4, в представлена карта рельефа поверхности одиночного кристалла, из которой видно, что разность перепадов не превышает 10 мкм. Результаты энергодисперсионной спектроскопии (рис. 4, г) показали элементный состав кристаллов: О ~ 38,60, Mg ~ 28,54, Si ~ 26,92 масс. %. Наличие углерода обосновано способом плавления [14] и не превышает 5 масс. %. Данное соотношение элементов говорит о формировании форстеритовой фазы Mg_2SiO_4 .

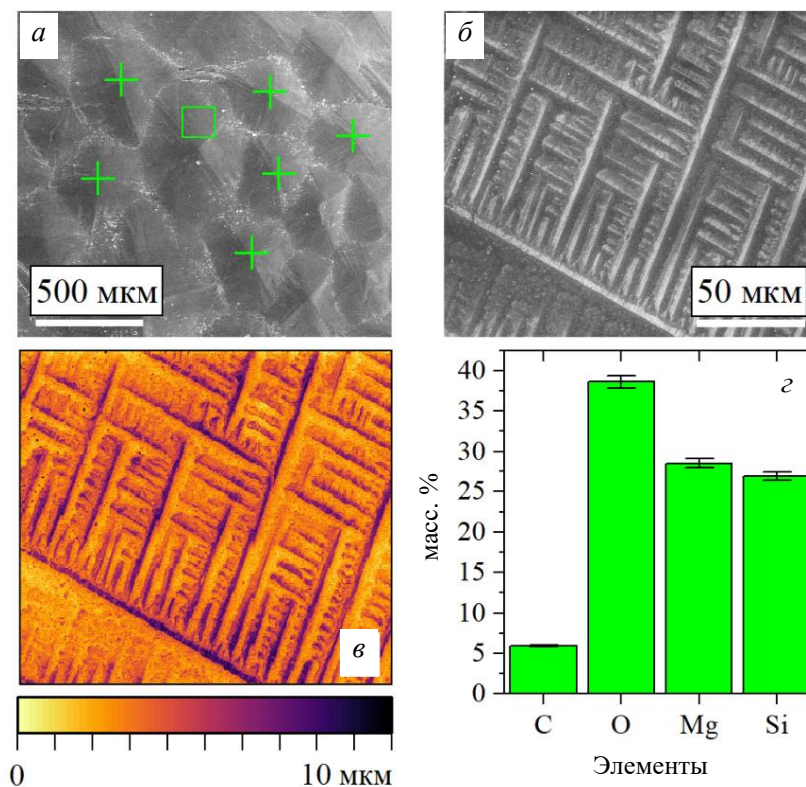


Рис. 4. Исследование морфологических особенностей поверхности синтезируемого образца F-1:

а – электронный снимок поверхности синтезируемого образца; б – электронный снимок поверхности кристалла; в – энергодисперсионный спектр с поверхности образца; г – карта рельефа поверхности одиночного кристалла

Fig. 4. Surface morphology of F-1 sample:

а – SEM image of the sample surface; б – SEM image of the crystal surface; в – block diagram of the single crystal surface texture; г – elemental analysis of the sample surface

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность синтеза форстеритового материала из природного и некондиционного материала с использованием энергии термической плазмы в атмосферной среде. Установлено, что при составе композиционных шихт $N = \text{MgO}/\text{SiO}_2$ со стехиометрическим соотношением $N = 1,34$ формируются продукты плавления с содержанием форстеритовой фазы Mg_2SiO_4 до 90 %. При этом присутствует рентгеноаморфная фаза, содержание которой варьируется от 5 до 12 %. Морфология поверхности синтезируемых образцов характеризуется плотной упаковкой гексагональных кристаллов размером от 180 до 250 мкм. Состав кристаллов представлен $\text{O} \sim 38,60$, $\text{Mg} \sim 28,54$, $\text{Si} \sim 26,92$ масс. %, что соответствует фазе Mg_2SiO_4 . Стоит отметить, что одиночные кристаллы формируются из группы игольчатых микрокристаллов размером от 2 до 10 мкм, расположенных симметрично, но в то же время перекрывающих друг друга, тем самым образуется решетчатая структура. Угол роста между микрокристаллами стремится к $\sim 87\text{--}94^\circ$, что указывает на строгое протекание процесса кристаллизации.

Полученные материалы будут интересны представителям в области получения огнеупорных материалов. Следующим этапом работы планируется провести комплекс экспериментальных исследований по выявлению граничных условий составов композиционных шихт, пригодных для формирования форстеритового материала, с целью исключения стадии термического разложения магнезита MgCO_3 при подготовке исходных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беляков А.В., Попова Н.А., Гринберг Е.Е., Стрельникова И.Е., Амелина А.Е., Левин Ю.И. Синтез форстерита и муллита алкоксидным золь-гель методом // Перспективные материалы. 2014. № 12. С. 66–73.
2. Andrianov N.T., Strel'nikova S.S., Dyagilets S.M. Forsterite ceramics based on sol-gel powders // Стекло и керамика. 2004. № 1. Р. 15–17.
3. Nguyen M., Sokolar R. The influence of the raw materials mixture on the properties of forsterite ceramics // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 385. P. 012039.
4. Зу Х., Вей И., Денг Ч. Синтез MgO-SiC-C огнеупорного композитного порошка на основе форстерит-С сырья // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 1–2. С. 84–86.
5. Sanosh K.P., Balakrishnan A., Francis L., Kim T.N. Sol-gel synthesis of forsterite nanoparticles with narrow particle size distribution // Journal of Alloys and Compounds. 2010. V. 495. № 1. P. 113–115.
6. Воробьёва Л.Б., Зонова А.Д., Степанова С.А. Влияние способа получения оксида магния на микроструктуру форстеритовой керамики // Интерэкспо Гео-Сибирь. Сибирский государственный университет геосистем и технологий (Новосибирск). 2014. Т. 5. № 2. С. 115–120.
7. Andrianov N.T., Strel'nikova S.S., Dyagilets S.M., Fedorova S.Yu. The effect of feedstock nature on the synthesis of forsterite prepared by sol-gel method // Стекло и керамика. 2002. № 6. Р. 16–19.
8. Hossain S.K.S., Mathur L., Singh P., Majhi M.R. Preparation of forsterite refractory using highly abundant amorphous rice husk silica for thermal insulation // Journal of Asian Ceramic Societies. 2017. V. 5. P. 82–87.
9. Афонина Г.А., Леонов В.Г., Попова О.Н. Влияние условий гидролиза тетраэтоксисилана на синтез форстерита // Стекло и керамика. 2008. № 12. С. 27–30.
10. Nemat S., Ramezani A.S., Emami M. Recycling of waste serpentine for the production of forsterite refractories: the effects of various parameters on the sintering behavior // Journal of the Australian Ceramic Society. 2019. V. 55. P. 425–431.

11. *Hassanzadeh-Tabrizi S.A.* Spark plasma sintering of forsterite nanopowder and mechanical properties of sintered materials // *Ceramics International*. 2017. V. 43. P. 15714–15718.
12. *Hassan Gheisari, Ebrahim Karamian.* Preparation Of NANO Crystalline Forsterite Synthesized by Mechanical Activation to use Orthopedic and Dental Applications // *Engineering Solutions for Sustainability: Materials and Resources II*. 2015. V. 18–19. P. 219–223.
13. *Junya Nishizawa, Tomoko Ikeda-Fukazawa.* Surface structures and properties of forsterite in crystalline and glassy states // *Chemical Physics Letters*. 2019. V. 714. P. 197–201.
14. *Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Ушков В.А., Зорин Д.А.* Получение стеклокерамики системы MgO–SiO₂ методом плазменной плавки // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48. №. 24. С. 15–18.
15. *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.
16. *Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б.* Синтез алюмомагнезиальной керамики MgAl₂O₃ в среде термической плазмы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 3. С. 138–146.
17. *Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Гафаров Р.Е., Волокитин О.Г.* Оптимизация процесса синтеза муллитовой керамики в среде термической плазмы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 4. С. 130–138.

REFERENCES

1. *Belyakov A.V., Popova N.A., Grinberg E.E., Strel'nikova I.E., Amelina A.E., Levin Yu.I.* Synthesis of forsterite and mullite by alkoxide sol-gel method. *Promising materials*. 2014; (12): 66–73. (In Russian).
2. *Andrianov N.T., Strel'nikova S.S., Dyagilets S.M.* Forsterite ceramics based on sol-gel powders. *Glass and Ceramics*. 2004; 61 (1–2): 16–18.
3. *Nguyen M., Sokolar R.* The influence of the raw materials mixture on the properties of forsterite ceramics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 385: 012039.
4. *Zu H., Wei I., Deng Ch.* Synthesis of MgO-SiC-C refractory composite powder based on forsterite-C raw materials. *Refractories and Technical Ceramics*. 2011; (1–2): 84–86.
5. *Sanosh K.P., Balakrishnan A., Francis, L., Kim, T.N.* Sol-gel synthesis of forsterite nanopowders with narrow particle size distribution. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. 495 (1): 113–115.
6. *Vorobieva L.B., Zonova A.D., Stepanova S.A.* Influence of the method of obtaining magnesium oxide on the microstructure of forsterite ceramics. *Interexpo Geo-Sibir'. Sibirskii gosudarstvennyi universitet geosistem i tekhnologii* (Novosibirsk). 2014; 5 (2): 115–120. (In Russian).
7. *Andrianov N.T., Strel'nikova S.S., Dyagilets S.M., Fedorova S.Yu.* The effect of initial components on the synthesis of forsterite produced by the sol-gel method. *Glass and Ceramics*. 2002; 59 (5–6): 199–202.
8. *Hossain S.K.S., Mathur L., Singh P., Majhi M.R.* Preparation of forsterite refractory using highly abundant amorphous rice husk silica for thermal insulation. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2017; 5: 82–87.
9. *Afonina, G.A., Leonov V.G., Popova O.N.* Effect of the conditions of hydrolysis of tetraethoxysilane on the synthesis of forsterite. *Glass and ceramics*. 2008; 65 (11–12): 447–451.
10. *Nemat S., Ramezani A.S., Emami M.* Recycling of waste serpentine for the production of forsterite refractories: the effects of various parameters on the sintering behavior. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2019; 55: 425–431.
11. *Hassanzadeh-Tabrizi S.A.* Spark plasma sintering of forsterite nanopowder and mechanical properties of sintered materials. *Ceramics International*. 2017; 43: 15714–15718.
12. *Hassan Gheisari, Ebrahim Karamian.* Preparation of NANO crystalline forsterite synthesized by mechanical activation to use orthopedic and dental applications. *Engineering Solutions for Sustainability: Materials and Resources II*. 2015; 18–19: 219–223.
13. *Junya Nishizawa, Tomoko Ikeda-Fukazawa.* Surface structures and properties of forsterite in crystalline and glassy states. *Chemical Physics Letters*. 2019; 714: 197–201.

14. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Ushkov V.A., Zorin D.A. Obtaining glass ceramics of the MgO–SiO₂ system by plasma melting. *Pisma v ZhTF*. 2022; 48 (24): 15–18. (In Russian).
15. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Gafarov R.E. Synthesis of mullite-containing ceramics in a low-temperature plasma medium. *Glass Physics and Chemistry*. 2022; 48 (5): 630–634. (In Russian).
16. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Ulmasov A.B. Synthesis of aluminum-magnesian ceramics mgal₂o₃ in thermal plasma environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 138–146. (In Russian).
17. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Gafarov R.E., Volokitin O.G. Optimized synthesis of mullite ceramics in thermal plasma. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (4): 130–138. (In Russian).

Сведения об авторах

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

Скрипникова Нелли Карповна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nks2003@mail.ru

Кунц Олеся Анатольевна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kunts.98@mail.ru

Authors Details

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

Nelli K. Skripnikova, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nks2003@mail.ru

Olesya A. Kunts, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kunts.98@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2022
Одобрена после рецензирования 12.01.2023
Принята к публикации 23.01.2023

Submitted for publication 26.12.2022
Approved after review 12.01.2023
Accepted for publication 23.01.2023