

Научная статья

УДК 549.632

DOI: 10.14489/glc.2026.02.pp.040-047

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ В ТЕРМОСТОЙКИХ КОРДИЕРИТСОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Р. Ю. Попов¹, Ф. И. Пантелеенко², А. Н. Шиманская¹, И. В. Каврус¹,
А. В. Бука¹, А. С. Самсонова¹, Т. В. Камлюк¹

¹Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Республика Беларусь, gosporov@mail.ru

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Представлены результаты исследования термостойкой электроизоляционной керамики, а также предложен механизм формирования кордиеритовой фазы в материалах при однократном обжиге на основе композиций, содержащих полиминеральное глинистое сырье, технический глинозем и тальк; представлены сведения о последовательности преобразований, протекающих в экспериментальных композициях при их термообработке; исследованы процессы фазообразования в керамике, подвергнувшейся воздействию различных температур, а также выявлены структурные особенности материала на основе разработанных составов керамических масс.

Ключевые слова: кордиерит, индиалит, муллит, двойник, термическое воздействие, свойство материала, структура, фазовый состав.

Для цитирования: Попов Р. Ю., Пантелеенко Ф. И., Шиманская А. Н., Каврус И. В., Бука А. В., Самсонова А. С., Камлюк Т. В. Процесс формирования кристаллических фаз в термостойких кордиеритсодержащих электротехнических материалах // Стекло и керамика. 2026. Т. 99, № 2. С. 40 – 47. DOI: 10.14489/glc.2026.02.pp.040-047

Research Article

THE PROCESS OF FORMATION OF CRYSTALLINE PHASES IN HEAT-RESISTANT CORDIERITE-CONTAINING ELECTRICAL MATERIALS

R. Yu. Popov¹, F. I. Panteleenko², H. M. Shymanskaya¹, I. V. Kavrus¹, A. V. Buka¹, A. S. Samsonova¹, T. V. Kamlyuk¹

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

The article presents the results of studies of heat-resistant insulating ceramics, as well as a mechanism of cordierite phase formation during single firing of compositions containing polymineral clay raw materials, technical alumina and talc; phase transformations during heat treatment of experimental compositions; the effect of firing temperatures on phase formation of ceramics. The research results are of theoretical and practical interest for synthesizing heat-resistant materials, expand the understanding of the processes occurring in multicomponent systems, and allow to better understand the sequence for crystalline phases formation, creating prerequisites for structurally controlled synthesis of ceramics with a given set of technical and operational characteristics.

Key words: cordierite, indialite, mullite, twin, thermal effect, material property, structure, phase composition.

For citation: Popov R. Yu., Panteleenko F. I., Shymanskaya H. M., Kavrus I. V., Buka A. V., Samsonova A. S., Kamlyuk T. V. The process of formation of crystalline phases in heat-resistant cordierite-containing electrical materials. *Steklo i keramika*. 2026;99(2):40-47. (in Russ). DOI: 10.14489/glc.2026.02.pp.040-047

Введение

Несмотря на то, что кордиеритовые материалы известны достаточно давно и используются в различных отраслях промышленности (керамической, станкостроительной, машиностроительной, химической и др.), исследования процессов, про-

исходящих при синтезе указанной керамики, продолжают быть актуальны и сегодня [1 – 6].

Интерес к таким материалам вызван их уникальными свойствами, а также относительной простотой производства. Следует отметить, что изделия получают как с помощью традиционных

технологий, так и 3D-печати, при этом применяется недефицитное, доступное сырье [3, 7, 8]. Среди многообразия технической керамики данный материал синтезируется при относительно низких температурах, не превышающих 1250...1350 °С, при использовании природного сырья, и не выше 1450 °С – на основе чистых оксидов [3, 9 – 12].

Керамика на основе кордиерита характеризуется достаточной прочностью (предел прочности при статическом изгибе – 26...207 МПа); высокой термостойкостью; огнеупорностью, которая может достигать 1450 °С в зависимости от применяемого сырья и используемых добавок; температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) – $(-0,2...5,7) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; удельным объемным электрическим сопротивлением, составляющим $10^{10}...10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в интервале температур 20...500 °С. Значения теплопроводности кордиерита, по сравнению с другими материалами, не являются высокими (1,7...4,0 Вт/(м·К) [5, 8, 9, 11 – 19].

Фазовый состав кордиеритовых изделий весьма разнообразен и во многом зависит от применяемого сырья, его соотношения, вводимых добавок и условий синтеза [2, 5, 8, 9, 11 – 21]. В таком материале могут присутствовать, кроме непосредственно кордиерита и его гексагональной модификации индиалита, муллит, кварц (и/или кристобалит), корунд, клиноэнстатит и шпинель. При существенном отклонении химического состава керамической массы от стехиометрического соотношения доля побочных фаз увеличивается. Кроме того, могут присутствовать и другие составляющие, которые определяются вводимыми в состав керамики добавками.

Методология работы

Экспериментальные композиции проектировались с максимальным приближением к стехиометрическому составу кордиерита. Источником SiO_2 и Al_2O_3 служило глинистое сырье, в качестве которого использовали каолин Глуховецкого месторождения (Украина), или огнеупорная глина Веселовского месторождения (Украина), или тугоплавкие глины месторождения Крупейский сад (Республика Беларусь). Недостающее количество оксида алюминия вводили глиноземом. Для обеспечения необходимого содержания оксида магния в сырьевой композиции применяли тальк, который одновременно включает SiO_2 .

Образцы керамики изготавливали методом полусухого прессования. Пресс-порошок получали путем увлажнения до влажности 6...8 масс. % и

грануляции керамических масс, предварительно измельченных в планетарной лабораторной мельнице Retsch PM-100. Прессование образцов осуществляли на гидравлическом прессе при давлении около 35...40 МПа. После сушки при $100 \pm 10 \text{ °C}$ образцы обжигали в электрической муфельной печи в интервале температур 1100...1350 °С. Скорость подъема температуры составляла 250...300 °С/ч. Охлаждение печи – инерционное.

Определение водопоглощения и кажущейся плотности осуществляли согласно ГОСТ 2409–2014. Измерение ТКЛР образцов керамических материалов проводили на электронном dilatометре DIL 402 PC Netzsch (Германия) в интервале температур 20...400 °С (скорость подъема температуры – 5 °С/мин (ГОСТ 27180–2019)).

Изучение фазового состава синтезированных материалов проводили с помощью дифрактометра D8 ADVANCE Bruker AXS (Германия). Структуру и химический состав исследовали сканирующим электронным микроскопом JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 JEOL (Япония).

Экспериментальная часть

Физико-химические свойства полученных керамических материалов приведены в табл. 1.

Установлено, что электросопротивление образцов, синтезированных на основе каолинового сырья и огнеупорной глины, обожженных при 1300 °С, находилось в пределах $(2,16...7,10) \cdot 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 100 °С, с использованием тугоплавкой глины «Крупейский сад» при таких же условиях – $4,25 \cdot 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Комплексный анализ экспериментальных данных, полученных с помощью dilatометрического и рентгеноструктурного анализа, а также электронной микроскопии, позволил определить, что качественный состав керамики, синтезированной при 1300 °С, представлен преимущественно низкотемпературным ромбическим β -кордиеритом, а также его высокотемпературной гексагональной полиморфной модификацией – индиалитом. Количество содержание кордиеритовой фазы составляет не менее 80 %.

В качестве аксессуарных кристаллических фаз в образцах могли присутствовать муллит, энстатит, корунд, кристобалит, α -кварц.

Как известно, образование кордиерита из смеси сырьевых материалов, включающей глинистый материал, тальк и глинозем, можно описать следующим образом [22, 23]:

1) дегидратация каолинита с образованием метакаолинита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$);

Таблица 1

Сравнительный анализ свойств образцов термостойкой керамики, полученной на основе различного глинистого сырья

Глинистый материал, на основе которого получены образцы	Температура обжига, °С	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	ТКЛР, α·10 ⁶ К ⁻¹
Каолин	1200	18,0...25,0	1650...1900	4,0...9,0
	1250	15,0...23,0	1700...2000	3,0...6,0
	1300	12,0...20,0	1800...2050	2,0...4,0
Огнеупорная глина	1200	15,0...17,5	1900...1950	4,0...4,5
	1250	14,5...15,0	1950...2000	3,0...3,5
	1300	13,0...14,5	2000...2050	2,0...2,5
Тугоплавкая глина	1200	24,0...24,5	1750...1800	8,0...8,5
	1250	22,5...23,0	1750...1800	9,0...9,5
	1300	17,5...18,5	1850...1900	1,5...2,5

2) превращение метакаолинита в муллит (3Al₂O₃·2SiO₂). В зависимости от структурных особенностей каолинита и метакаолинита может наблюдаться разложение последнего с образованием γ-Al₂O₃ и аморфного SiO₂;

3) разложение талька с образованием метасиликата магния (MgO·SiO₂);

4) взаимодействие муллита и метасиликата магния с образованием кордиерита, шпинели (MgO·Al₂O₃).

Проведенные исследования показали, что увеличение температуры обжига образцов привело к снижению содержания муллита, при этом количество кордиерита повышалось, что подтверждает вышеуказанный механизм фазообразования.

С одной стороны, благодаря наличию в исходных природных материалах дефектов структуры, примесных составляющих, гидратных оболочек и др., обеспечивается интенсивное взаимодействие между ними [22, 24].

Однако присутствующие примеси, наряду с технологическими параметрами получения керамики (особенностями подготовки керамической массы, температурой обжига, продолжительностью выдержки при максимальной температуре), оказывают значительное влияние на кристаллизационные процессы. Поэтому многие ученые отмечают, что точный фазовый состав керамики, полученной с использованием природного сырья, предугадать проблематично.

Для изучения процессов структуро- и фазообразования керамического материала при термообработке необходимо проанализировать особенности кристаллического строения как минералов, присутствующих в применяющихся сырьевых материалах, так и образующихся (табл. 2). Для некоторого упрощения в качестве глинистого минерала рассматривается только каолинит.

Кордиерит относится к кольцевым силикатам, кольца [Si₄Al₂O₁₈] располагаются в шахматном

Таблица 2

Структурные характеристики минералов [25]

Минерал и его химическая формула	Сингония	Происхождение
Исходные материалы, использующиеся при синтезе керамики		
Каолинит (Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄)	Триклинная, моноклиная	Природное
Тальк (Mg ₃ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂)	Моноклиная	
Глинозем (α-Al ₂ O ₃)	Ромбоэдрическая (тригональная)	Синтетическое
Глинозем (γ-Al ₂ O ₃)	Тетрагональная	

Минерал и его химическая формула	Сингония	Происхождение
Кристаллические фазы, формирующиеся в процессе термической обработки образцов		
Кордиерит ($\text{Al}_3(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_2(\text{Si}_5\text{Al})\text{O}_{18}$)	Ромбическая	Синтетическое
Индиалит ($\text{Al}_3(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_2(\text{Si}_5\text{Al})\text{O}_{18}$)	Гексагональная	
Корунд (Al_2O_3)	Тригональная	
Шпинель (MgAl_2O_4)	Кубическая	
Кварц (SiO_2)	Тригональная	
α -кristобалит (SiO_2)	Тетрагональная, кубическая	
β -кristобалит (SiO_2)	Кубическая, моноклинная (триклинная)	
Метасиликат магния (MgSiO_3)	Ромбическая	
Муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	Ромбическая	

порядке и объединяются октаэдрами $[\text{MgO}_6]$, а также $[\text{SiO}_4]$ - и $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдрами в трехмерный каркас [21, 26, 27]. Некоторое количество ионов алюминия может находиться в октаэдрической позиции. При повышении температуры наблюдается полиморфное превращение кордиерита в индиалит – фазовый переход «порядок–беспорядок», который связан с разупорядочением распределения ионов Al и Si в межкольцевых и кольцевых тетраэдрических позициях. Указанный фазовый переход относится к первому роду, поскольку сопровождается скачкообразным изменением теплоемкости, энтропии и энтальпии. Стабилизацию разупорядоченной структуры индиалита обеспечивают примесные ионы щелочных и щелочноземельных металлов, а также железа, располагающиеся внутри каналов, образованных шестичленными кольцами [21]. В связи с этим в структуре керамики идентифицируются одновременно обе полиморфные модификации.

Однако, кроме указанных кристаллических фаз, могут образоваться кордиеритоподобные, представляющие собой твердые растворы с избытком или недостатком ионов кремния или алюминия и обладающие различной степенью упорядоченности. Классифицировать полиморфные модификации кордиерита принято с помощью индекса искажения Δ . Так, индекс искажения индиалита составляет 0,00; кордиерита – около 0,25; твердых растворов – $0 < \Delta < 0,20^\circ$.

Рядом авторов [28 – 33] отмечается, что при переходе от высоко- к низкоупорядоченной структуре осуществляется образование субмикроскопических модулированных (промежуточного метастабильного состояния) и доменных структур.

Так, согласно данным [34] образование кордиерита в магматических горных породах происходит путем упорядочения структуры индиалита, причем промежуточной стадией является формирование секториальных двойников гексагонального габитуса. В исследовании [35] идет речь о псевдодвойниках (продуктах переходного процесса), которые образуются в результате сращения двух пластинок кордиерита, связанных зеркально.

Образование указанных промежуточных структур, приводящее к последующему формированию секториальных двойников, объясняется следующим образом [33]. Атомы Al и Si (упорядочивающие атомы), находящиеся в тетраэдрических позициях, могут перемещаться из одного тетраэдра в другой, при этом Mg и O способны сместиться лишь на короткое расстояние от своего положения. Радиус Al превышает радиус Si, поэтому $[\text{AlO}_4]$ -тетраэдры занимают больший объем, в результате чего атомы кислорода, находящиеся в вершинах подобных тетраэдров, выталкиваются наружу и оказывают воздействие на соседние, вызывая искажение кристаллической решетки, распространяющееся по всему кристаллу. Указанные деформации, а также локальные взаимодействия между тетраэдрическими кольцами объясняют формирование секториальных двойников в кордиерите.

Не следует исключать влияния примесных ионов на кристаллографические особенности структур, температурные интервалы формирования кристаллических фаз и полиморфные превращения. Например, более крупные атомы железа способны замещать магний в октаэдрах $[\text{MgO}_6]$, что также вызывает закономерную деформацию кристаллической решетки.

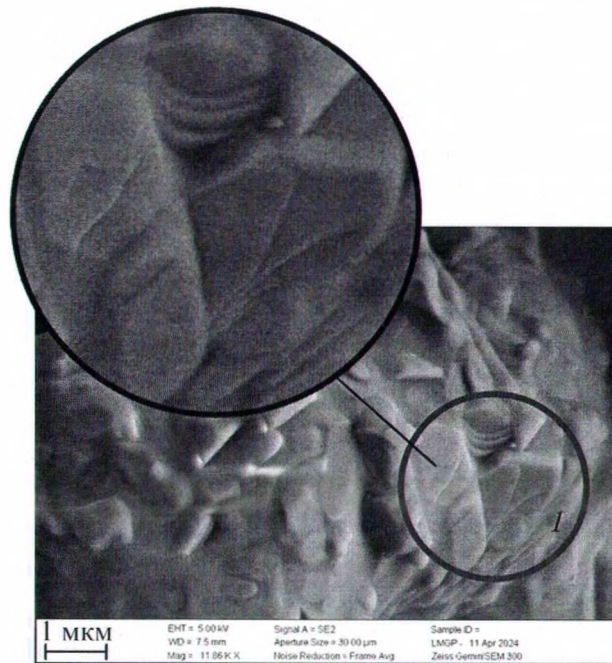


Рис. 1. Морфологические особенности структуры кордиеритсодержащей керамики, полученной при 1250 °С

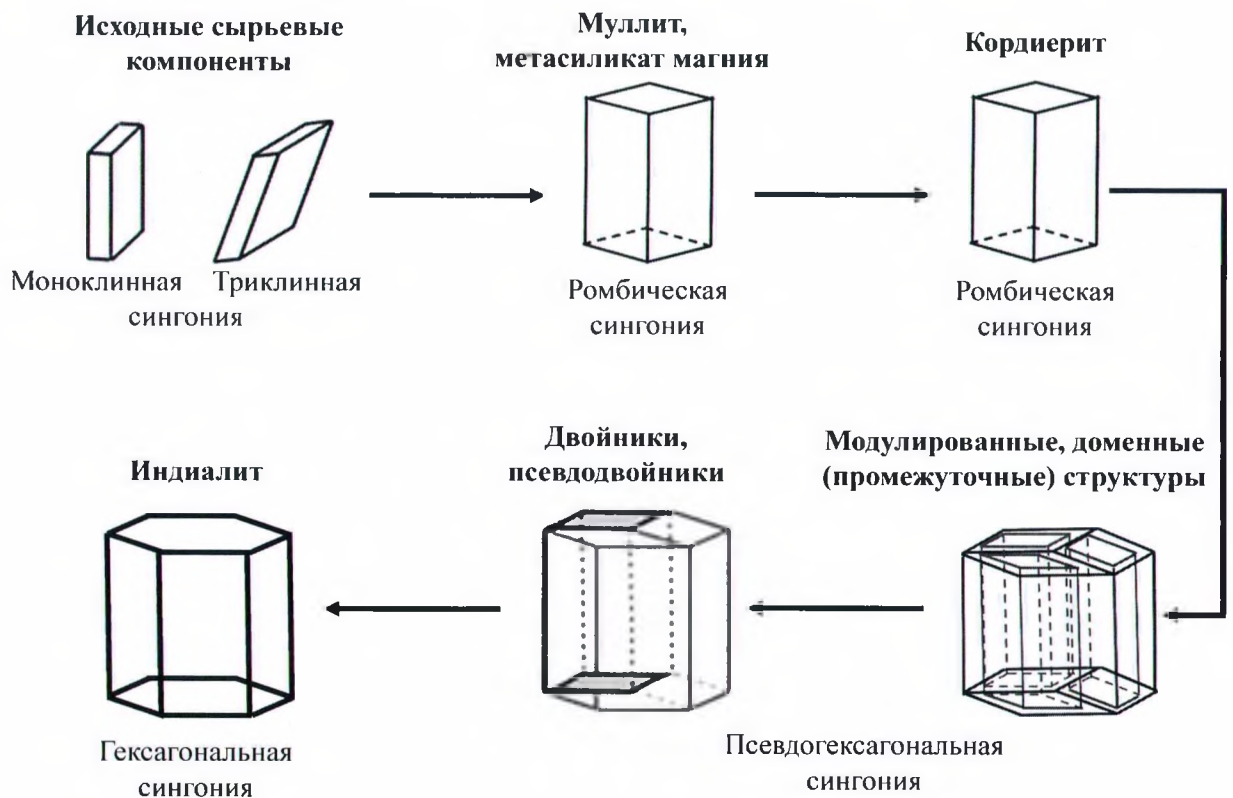


Рис. 2. Структурные преобразования, протекающие при высокотемпературной обработке кордиеритсодержащей керамики

В структуре синтезированных керамических материалов обнаружены двойниковые кристаллы кордиерита (область 1, рис. 1), что позволяет предположить, что формированию индиалита при тер-

мообработке керамики предшествует образование двойников, имитирующих его структуру. Полученные данные подтверждаются также результатами рентгенофазового и дилатометрического анализов

и не противоречат правилу Оствальда, согласно которому в первую очередь формируется структура, требующая преодоления меньшего энергетического барьера, т.е. «ближайшая» [28].

Структурные преобразования при обжиге представлены на рис. 2.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить последовательность структурных преобразований природных сырьевых материалов, обеспечивающих формирование идиалита в процессе обжига керамики. Выявлено, что промежуточной стадией полиморфного превращения кордиерита в идиалит является образование секториальных двойников гексагонального габитуса.

Результаты исследований представляют теоретический и практический интерес в области синтеза термостойких материалов, расширяют представления о процессах, происходящих в многокомпонентных системах, и позволяют приблизиться к пониманию последовательности формирования кристаллических фаз, создавая предпосылки для структурно управляемого синтеза керамики с заданным набором технико-эксплуатационных характеристик.

Исследования проводились в рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2025 год.

Список литературы

- Zhang S., Li W., Zhang X., et al. Efficient catalytic oxidation of ethanol over Pt/Ce–Mn–Ti–O catalysts supported on cordierite honeycombs // *Materials Letters*. 2025. V. 382. P. 137934.
- Keziz A., Heraiz M., Sahnoune F., et al. Characterization and mechanisms of the phase's formation evolution in sol-gel derived mullite/cordierite composite // *Ceramics International*. 2023. V. 49, No. 20. P. 32989 – 33003.
- Wang H., Wang S., Meng Z., et al. Mechanism of cordierite formation obtained by high temperature sintering technique // *Ceramics International*. 2023. V. 49, No. 12. P. 20544 – 20555.
- Черных М. В., Мамонтов Г. В. Блочные катализаторы на основе оксидов Се и Мп и кордиеритовой керамики для разложения озона // *Катализ в промышленности*. 2024. Т. 24, № 4. P. 16 – 24.
- Khattab R. M., Abo-Almaged H. H., Ajiba N. A., et al. Sintering, physicochemical, thermal expansion and microstructure properties of cordierite ceramics based on utilizing silica fume waste // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. V. 270. P. 124829.
- Ismail H., Mohamad H. Preparation of porous cordierite/pseudo-wollastonite biocomposite and study bioactivity properties // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 66, Part 5. P. 2730 – 2733.
- Dorado B., Moreno-Sanabria L., García E., et al. 3D printing of cordierite materials from raw reactive mixtures // *Ceramics International*. 2023. V. 49, No. 3. P. 4578 – 4585.
- Tai Y., Ji H., Ma T., et al. Fabrication of dense cordierite ceramics with high mechanical properties via interlayer defect-free digital light processing (DLP) // *Ceramics International*. 2025. V. 51, No. 19, Part A. P. 28176 – 28185.
- Li Z., Jiang H., Cui J., et al. A simple method for the preparation of cordierite ceramics with high strength and low thermal expansion coefficient // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024. V. 5, No. 5. P. 3162 – 3170.
- An D., Wang L., Liu X., et al. Preparation and properties of cordierite-based multi-phase composite far-infrared emission ceramics by fine-grained tailings // *Ceramics International*. 2024. V. 50, No. 17, Part A. P. 29729 – 29737.
- Li Z., Jiang H., Cui J., et al. Dense and high flexural strength cordierite ceramics doped with Li₂O // *Ceramics International*. 2024. V. 50, No. 13, Part B. P. 24119 – 24125.
- Kuscer D., Bantan I., Hrovat M., Malič B. The microstructure, coefficient of thermal expansion and flexural strength of cordierite ceramics prepared from alumina with different particle sizes // *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. V. 37, No. 2. P. 739 – 746.
- Park C. O., Lee J. H., Lee D. K. Enhancement of flexural strength by slip casting cordierite ceramics with h-BN nanoparticles // *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*. 2024. V. 62, No. 4. P. 299 – 305.
- Harrati A., Arkame Y., Manni A., et al. Cordierite-based refractory ceramics from natural halloysite and peridotite: Insights on technological properties // *Journal of the Indian Chemical Society*. 2022. V. 99, No. 6. P. 100496.
- Yan G., Chen L., Jiang Q. Thermal/mechanical properties of cordierite synthesized using coal gangue as a refractory material // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024. V. 22, No. 2. P. 14987.
- Cordierite (2MgO·2Al₂O₃·5SiO₂) [Electronic resource]: KYOCERA Corporation. URL: <https://global.kyocera.com/prdct/fc/material-property/material/cordierite/index.html> (date of access: 27.11.2025).
- Lee J.-S., Kim J.-W., Park J.-S. The effect of the MgO/Al₂O₃ ratio on the thermal and refractory behaviors of cordierite ceramics // *Materials*. 2025. V. 18, No. 1. P. 168.
- AC6129 Cordierite Refractory Brick [Electronic resource]: Advanced Ceramic Materials owned by Oceania International LLC. URL: <https://www.preciseceramic.com/ac6129-cordierite-refractory-brick.html> (date of access: 27.11.2025).
- Ponomarev S. G., Reznichenko A. V., Kormilitsyn M. N., et al. Cordierite material with increased heat resistance // *Refract Ind Ceram*. 2023. V. 64. P. 311 – 317.

20. Klika Z., Valášková M., Bartoňová L., Maierová P. Quantitative evaluation of crystalline and amorphous phases in clay-based cordierite ceramic // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 1122.
21. Valaskova M. Clays, clay minerals and cordierite ceramics – a review // *Ceramics – Silikáty*. 2015. V. 59, No. 4. P. 331 – 340.
22. Valaskova M., Klika Z., Novosad B., Smetana B. Crystallization and quantification of crystalline and non-crystalline phases in kaolin-based cordierites // *Materials*. 2019. V. 12, No. 19. P. 3104.
23. Benito J. M., Turrillas X., Cuello G. J., et al. Cordierite synthesis. A time-resolved neutron diffraction study // *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. V. 32, No. 2. P. 371 – 379.
24. Kumar S., Singh K. K., Ramachandrarao P. Synthesis of cordierite from fly ash and its refractory properties // *Journal of Materials Science Letters*. 2000. V. 19. P. 1263 – 1265.
25. Mindat.org [Electronic resource]. URL: <https://www.mindat.org/> (date of access: 27.11.2025).
26. Расцветаева Р. К. Ферроиндиалит и его уникальная симметрия: структура минералов группы берилла // *Природа*. 2022. № 8. С. 29 – 36.
27. Haefeker U., Kaindl R., Tropper P., et al. Structural investigations of the two polymorphs of synthetic Fe-cordierite and Raman spectroscopy of hexagonal Fe-cordierite // *Miner Petrol*. 2014. V. 108. P. 469 – 478.
28. Урусов В. С., Таусон В. Л., Акимов В. В. Геохимия твердого тела. Москва: ГЕОС, 1997. 500 с.
29. Salje E. Structural states of Mg-cordierite II: Landau theory // *Phys Chem Minerals*. 1987. V. 14. P. 455 – 460.
30. Capitani G. C., Doukhan J.-C., Malcherek T., Carpenter M. Strain modulation around inclusions in an annealed natural cordierite // *European Journal of Mineralogy*. 2001. V. 13, No. 5. P. 921 – 928.
31. Finkelstein G. J., Dera P. K., Duffy T. S. High-pressure phases of cordierite from single-crystal X-ray diffraction to 15 GPa // *American Mineralogist*. 2015. V. 100, No. 8–9. P. 1821 – 1833.
32. Затолокина К. И., Томиленко А. А., Бульбак Т. А., Лепезин Г. Г. Летучие компоненты в кордиерите и сосуществующих с ним турмалине и кварце из пегматитов месторождения кухилал (памир, таджикистан) // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62, № 10. С. 1411 – 1431.
33. Blackburn J., Salje E. Time evolution of twin domains in cordierite: a computer simulation study // *Phys Chem Min*. 1999. V. 26. P. 275 – 296.
34. Zeck H. P. Transformation trillings in cordierite // *Journal of Petrology*. 1972. V. 13, No. 3. P. 367 – 380.
35. Kitamura M., Hiroi Y. Indialite from Unazuki pelitic schist, Japan, and its transition texture to cordierite // *Contr. Mineral. and Petrol*. 1982. V. 80. P. 110 – 116.

Поступила в редакцию / Received 25.11.2024

Принята к публикации / Accepted 28.01.2026

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследования проводились в рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2025 год.

Financing. The research was conducted as part of the 2025 Presidential Grant for Science in the Republic of Belarus.

Сведения об авторах / Information about authors

Ростислав Юрьевич Попов – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь

Rostislav Yu. Popov – Ph.D., Associate Professor of the Department of Glass, Ceramics and Binding Materials Technology, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: rosropov@mail.ru.

SPIN РИНЦ: 6046-0842. **ORCID:** 0000-0001-5716-9593. **SCOPUS ID:** 9042520800

Федор Иванович Пантелеенко – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов», член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет (БНТУ), Минск, Республика Беларусь

Fedor I. Panteleenko – DSc, Professor, Professor of the Department “Powder metallurgy. Welding and Material's Technology”, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Honored Worker of Science of the Republic of Belarus, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: panteleyenokofi@bntu.by.

SPIN РИНЦ: 5311-0936. **ORCID:** 0000-0003-3705-3205. **SCOPUS ID:** 6603424191

Анна Николаевна Шиманская – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь

Hanna M. Shymanskaya – Ph.D., lecturer of the Department of Glass, Ceramics and Binding Materials Technology, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: anna.shimanskaya.86@mail.ru.

SPIN РИНЦ: 1089-4657. **ORCID:** 0000-0002-8544-5134. **SCOPUS ID:** 58527663100

Иван Владимирович Каврус – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Центра физико-химических методов исследования, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь

Ivan V. Kavrus – Ph.D., Associate Professor, senior researcher at the Center for Physico-Chemical Research Methods, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: kavrus@belstu.by.

SPIN РИНЦ: 2110-7048

Алексей Валентинович Бука – аспирант кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь

Alexey V. Buka – postgraduate student of the Department of Glass, Ceramics and Binding Materials Technology, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: lesha_buka@hotmail.com.

SPIN РИНЦ: 9376-0341

Александра Сергеевна Самсонова – специалист Сектора охраны интеллектуальной собственности, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь

Aleksandra S. Samsonova – specialist of the Intellectual Property Protection Sector, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: aleksasha_samsonova97@mail.ru.

SPIN РИНЦ: 7280-8329

Татьяна Владимировна Камлюк – старший научный сотрудник, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь

Tatjana V. Kamliuk – senior researcher, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: kamlik@mail.ru