

УДК 666.7

DOI: 10.14489/glc.2023.04.pp.012-021

Научная статья

# СИНТЕЗ ВОЛЛАСТОНИТСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Р. Ю. Попов, Е. М. Дятлова, А. С. Самсонова, А. Н. Шиманская

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Республика Беларусь, shimanskaya@belstu.by

Разработаны составы керамических масс для получения волластонитсодержащей керамики с применением отечественного карбонатного и кремнеземистого сырья. Установлены особенности формирования структуры и фазового состава синтезированных керамических материалов во взаимосвязи с физико-химическими свойствами и эксплуатационными характеристиками. Определено влияние минерализующей добавки (природного волластонита) на процессы спекания и фазообразования, выявлена взаимосвязь между показателями физико-технических и теплофизических свойств, температурой обжига и количеством вводимого минерализатора. Результаты исследований представляют теоретический и практический интерес при организации производства керамического огнеприпаса на основе волластонита.

**Ключевые слова:** волластонит, оснастка литейных установок, фазовый состав, структура, температурный коэффициент линейного расширения, термостойкость, огнеупорность.

**Для цитирования:** Попов Р. Ю., Дятлова Е. М., Самсонова А. С., Шиманская А. Н. Синтез волластонитсодержащей керамики на основе природного сырья Республики Беларусь // *Стекло и керамика*. 2023. Т. 96, № 4. С. 12 – 21.

DOI: 10.14489/glc.2023.04.pp.012-021

---

## SYNTHESIS OF WOLLASTONITE-CONTAINING CERAMICS FROM NATURAL RAW MATERIALS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

R. Yu. Popov, E. M. Dyatlova, A. S. Samsonava, H. M. Shymanskaya

Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Compositions of ceramic masses for obtaining wollastonite-containing ceramics using domestic carbonate and siliceous raw materials were developed. The features of the formation of the structure and phase composition of synthesized ceramic materials in connection with the physicochemical properties and operational characteristics were established. The influence of a mineralizing additive (naturally occurring wollastonite) on the processes of sintering and phase formation was determined, the relationship between the physical-technical and thermophysical properties, the firing temperature and the amount of additive introduced was revealed. The results of the research are of theoretical and practical interest in organizing the production of refractory products based on wollastonite.

**Key words:** wollastonite, foundry equipment, phase composition, structure, temperature coefficient of linear expansion, heat resistance, refractoriness.

**For citation:** Popov R. Yu., Dyatlova E. M., Samsonava A. S., Shymanskaya H. M. Synthesis of wollastonite-containing ceramics from natural raw materials of the Republic of Belarus. *Steklo i keramika*. 2023;96(4):12-21. (in Russ).

DOI: 10.14489/glc.2023.04.pp.012-021

---

Волластонитовые материалы отличаются высокой химической инертностью к расплаву алюминия, благодаря чему находят все более широкое использование в качестве футеровочных и функциональных конструктивных элементов оснастки литейных установок [1]. На ряде предприятий Министерства промышленности Республики Беларусь технологией производства предусмотрено кокильное литье, причем прибыльная часть и литейная чаша кокилей, состоящие из керамического огнеупорного материала, импортируются из Италии и Российской Федерации. В связи с этим разработка технологии получения волластонитовой керамики с применением отечественных сырьевых материалов является актуальной задачей и позволит организовать конкурентное производство огнеупорного припаса в Республике Беларусь, повысить долю обеспечения внутреннего рынка отечественными товарами, а также расширить сырьевую базу керамической отрасли.

Традиционно волластонитовую керамику получают из природного минерала волластонита, содержащего минимальное количество примесей, для пластификации масс вводится небольшое количество огнеупорной глины [2].

Кроме того, в качестве сырьевых материалов могут применяться кальцийсодержащие и кремнеземистые компоненты, которые в процессе термообработки вступают во взаимодействие с образованием волластонита. Как известно [3, 4], по своим характеристикам синтетический волластонит не уступает природному аналогу, а по некоторым даже превосходит благодаря химической и минералогической однородности состава.

Согласно диаграмме оксидной системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$  [5] для синтеза волластонита в исходной сырьевой смеси необходимо обеспечить стехиометрическое соотношение  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ , равное 1:1. При этом оксид кальция преимущественно вводят карбонатами или карбонатолитами (кальцит, мел, мрамор, известняк и др.), а в качестве источников диоксида кремния применяются следующие: кварц, опока, диатомит, трепел, кварцевый песок, рисовая шелуха, вулканический пепел и др. [1, 3, 4, 6 – 10]. Следует отметить, что исходными компонентами шихты также могут служить горные породы, содержащие одновременно оба указанных оксида, например диатомовый мергель, а также  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$  техногенного происхождения, отсева дробления известковых горных пород и др. [7, 8, 10 – 12].

В кристаллическом фундаменте Беларуси известны два проявления волластонита – Рудмянское (Столбцовский район Минской области) и Глушкевичское (Лельчицкий район Гомельской области), относящиеся к двум генетическим типам – метаморфогенному и скарноидному. Волластонит обоих проявлений может использоваться в керамической промышленности, однако в настоящее время его добыча не осуществляется [13].

Учитывая сказанное, целью настоящего исследования является разработка составов керамических масс для получения волластонитсодержащей керамики с применением отечественных сырьевых компонентов, а также установление взаимосвязи «свойства материала – вид применяемого сырья, содержание вводимых добавок – условия синтеза керамики».

**Материалы и методы исследования.** В качестве сырьевых материалов для изготовления опытных образцов использовались: глина огнеупорная Веско экстра (Vesco, Украина, ТУ У 14.2-00282049-003), мел мелкогранулированный, сорт высший (ОАО «Красносельскстройматериалы», Республика Беларусь, ТУ РБ 590118065.007–2004), кварц молотый пылевидный (маршалит, марка А, ГОСТ 9077–82), трепел месторождения Стальное (ОДО «Трепел-М», Республика Беларусь, ТУ ВУ 700235363.001–2019), известь строительная гидратная (ОАО «Красносельскстройматериалы», Республика Беларусь, ГОСТ 9179–2018). Усредненный химический состав используемых компонентов приведен в табл. 1.

Изготовление опытных образцов осуществлялось полусухим прессованием. Предварительно измельченные до остатка 1–2 % на сите № 05 сырьевые компоненты взвешивали в необходимом количестве и перемешивали в планетарной мельнице РМ-100 Retsch (Германия) 20 мин. Приготовленную смесь увлажняли до влажности 6 – 8 % и гранулировали путем протирания через сито № 1, затем готовый пресс-порошок вылеживался в течение 3 сут. Формование изделий осуществлялось на гидравлическом лабораторном прессе при давлении 20 – 25 МПа. Сушку полученных образцов вели в сушильном шкафу SNOL 58/350 (Литва) при температуре  $100 \pm 10$  °С и затем обжигали в электрической печи SNOL 1,6,2,5.1/13,5-У1 (Литва). Максимальная температура обжига 1050, 1100, 1150 и 1200 °С; скорость подъема температуры 200 – 250 °С/ч; продолжительность выдержки при максимальной температуре 60 мин. После обжига образцы охлаждались инерционно.

Таблица 1

## Усредненный химический состав сырьевых материалов

Оксид	Массовое содержание оксидов в сырьевых материалах, %*				
	Глина огнеупорная	Мел	Известь	Маршалит	Трепел
SiO <sub>2</sub>	52,60	2,25	–	99,67	55,00
TiO <sub>2</sub>	1,20	0,98	–	–	0,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,85	0,29	–	0,20	5,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,79	0,15	–	0,03	1,73
CaO	1,24	52,67	76,92	0,05	15,78
MgO	0,17	1,87	1,57	–	0,87
Na <sub>2</sub> O	0,30	–	–	–	1,10
K <sub>2</sub> O	0,44	–	–	–	1,30
SO <sub>3</sub>	–	–	–	–	0,18
MnO	–	–	–	–	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	–	–	–	0,01
Потери при прокаливании	8,89	41,79	21,51	0,05	17,95

Для изучения кажущейся плотности, открытой пористости и водопоглощения применяли метод насыщения образцов водой с последующим гидростатическим взвешиванием (ГОСТ 2409–2014). Механическую прочность при сжатии синтезированных материалов определяли с помощью универсальной электромеханической испытательной машины Galdabini Quasar 100 (Италия) по стандартной методике согласно ГОСТ 4071.2–94, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) измеряли в интервале температур 20 – 300 °С на электронном dilatометре DIL-402 Netzsch (Германия) по ГОСТ 27180–2019. Для исследования теплопроводности использовали LFA-457 Netzsch (Германия). Термостойкость определяли согласно ГОСТ 7875.1–2018.

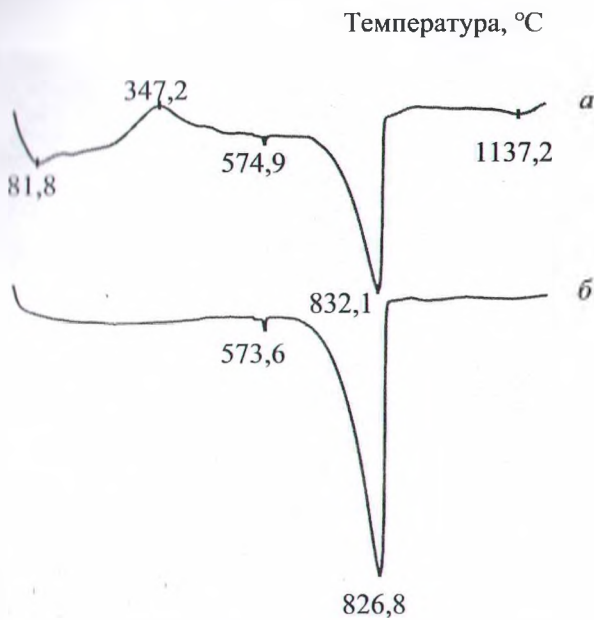
В целях установления структурных, фазовых и химических изменений в керамических массах в процессе термообработки проводили термический анализ на приборе DSC 404 F3 Pegasus Netzsch (Германия) в интервале температур 30 – 1200 °С в инертной среде (аргоне). Для определения кристаллических фаз, присутствующих в сырьевых и синтезированных материалах, применялся рентгенофазовый анализ, который осуществлялся на дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия). Запись рефрактограмм проводили на медном

катоде, для которого межплоскостное расстояние составляет  $1,5417 \cdot 10^{-9}$  нм. Сведения о микроструктуре исследуемых образцов, размере кристаллов, их форме и взаимном расположении получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 JEOL (Япония).

**Экспериментальная часть.** На первом этапе исследований для получения огнеупорных изделий готовили массы, включающие кремнеземистый (трепел или маршалит) и кальцийсодержащий (мел или известь) компоненты в соотношениях, обеспечивающих формирование волластонита с минимальным количеством примесных кристаллических фаз, а также 15,0 % глины Веско экстра в качестве пластификатора.

Установлено, что керамические массы, содержащие в качестве источника SiO<sub>2</sub> трепел, необходимо обжигать при температурах не более 1150 °С. Превышение указанного температурного предела приводит к пережогу материала, что связано с интенсивным образованием жидкой фазы в процессе термообработки (рис. 1). Как видно из табл. 1, в состав трепела входят оксиды щелочных металлов, а также оксид железа (III), которые могут образовывать легкоплавкие эвтектики с SiO<sub>2</sub>, CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

\* Здесь и далее по тексту, если не указано особо, приведено массовое содержание, %.



**Рис. 1. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии керамической массы, содержащей мел и трепел (а), мел и маршаллит (б) в качестве основных компонентов**

Цветовая гамма образцов, включающих трепел, изменялась от бежевого до кремово-оранжевого цвета при повышении температуры обжига от 1050 до 1150 °С. Интенсивность окраски керамических материалов, полученных на основе маршаллита, также увеличивалась. Так, при 1050 °С образцы характеризовались светло-пепельным цветом, а при 1200 °С – светло-серым.

Физико-химические свойства материалов, синтезированных в температурном интервале 1050 – 1200 °С, представлены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 2, можно сделать вывод, что материалы, синтезированные с исполь-

зованием трепела в качестве кремнеземистой составляющей, отличались более высокими прочностными характеристиками и не уступали по аналогам, описанным в работе [1]. По нашему мнению, это объясняется особенностями минералогического состава указанной горной породы. Трепел месторождения Стальное относится к известковому типу, в нем достаточно равномерно распределены кремниевая (опалкристиобалитовая), глинистая, карбонатная составляющие; содержание цеолитов, тонко рассеянных в матриксе, достигает 25 %. В породе также встречаются глауконит, обломки кварца, слюды алевритовой размерности и другие примеси [14]. Присутствие аморфного кремнезема и гидратных оболочек способствует активизации всех процессов, протекающих при синтезе керамики (спекание и фазообразование).

Следует отметить, что с увеличением температуры обжига в материалах наблюдалась закономерная интенсификация процессов спекания: фиксировалось постепенное увеличение кажущейся плотности керамики при снижении открытой пористости и водопоглощения, что объясняется особенностями формирования структуры материалов в процессе термообработки – природой и соотношением образующихся кристаллических фаз, количеством и химическим составом расплава, его свойствами (вязкость, проникающая способность, краевой угол смачивания и др.) (рис. 2).

Рентгенофазовый анализ позволил установить, что кристаллическая фаза синтезированных материалов представлена β-кварцем (β-SiO<sub>2</sub>), β-кристиобалитом (β-SiO<sub>2</sub>), волластонитом (Ca[SiO<sub>3</sub>]), псевдоволластонитом (Ca<sub>3</sub>[SiO<sub>3</sub>]<sub>3</sub>), ларнитом (Ca<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]) и геленитом (Ca<sub>2</sub>[Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>]) (табл. 3, рис. 3).

**Таблица 2**

**Физико-химические свойства полученных материалов**

Основные компоненты керамической массы	Температурный интервал обжига, °С	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	Открытая пористость, %	Водопоглощение, %	ТКЛР α·10 <sup>6</sup> , К <sup>-1</sup>	Механическая прочность при сжатии, МПа
Трепел и мел	1050 – 1150	1663 – 1735	36,1 – 39,9	20,8 – 24,0	8,04 – 9,50	13,0 – 32,9
Трепел и известь	1050 – 1150	1431 – 1503	44,8 – 47,2	29,8 – 33,0	8,97 – 9,24	8,7 – 11,6
Маршаллит и мел	1050 – 1200	1553 – 1602	43,4 – 45,1	27,1 – 29,1	8,10 – 9,64	1,8 – 5,0
Маршаллит и известь	1050 – 1200	1251 – 1300	50,9 – 51,5	39,2 – 41,2	9,41 – 9,64	0,4 – 1,5

Содержание указанных фаз зависит от температуры обжига и состава керамической массы. Согласно теоретическим данным, волластонит является низкотемпературной формой метасиликата кальция и при температуре около 1125 °С обратимо превращается в псевдоволластонит (высокотемпературная форма) [5]. Это объясняет увеличение интенсивности дифракционных максимумов псевдоволластонита с повышением температуры обжига.

Материалы, обладающие необходимым комплексом физико-химических свойств, отличаются более низким содержанием или отсутствием таких фаз, как  $\beta$ -кварц и  $\beta$ -кристобалит (см. рис. 3). Указанные фазы ухудшают термические характеристики керамики за счет высокого значения ТКЛР, что может отрицательно сказаться при эксплуатации синтезированного материала в экспериментальных условиях термостабильности. Установлено, что в результате взаимодействия трепела с известью образуется более высокое количество волластонита и псевдоволластонита по сравнению с мелом (рис. 3, а, б), что свидетельствует о большей реакционной способности.

Несмотря на соблюдение в керамических массах соотношения  $\text{CaO}$  и  $\text{SiO}_2$ , равного 1:1, при термообработке наблюдается образование ларнита, что, вероятно, связано с микрогетерогенностью исходных смесей.

Согласно работам [15, 16], ларнит не имеет при обычных условиях области стабильного существования. Температурная область метастабильного существования – от комнатной до 670 – 700 °С. При переходе метастабильной формы в стабильную наблюдается рассыпание спеченных материалов вследствие значительных объемных изменений – силикатный распад. Результаты исследований показали, что материалы, полученные с использованием в качестве сырьевых материалов маршалита и мела или извести, отличаются

значительным количеством ларнита, что объясняет их низкие прочностные характеристики и высокое водопоглощение.

На втором этапе исследований для активизации кристаллизации волластонита в составы керамических масс, включающие трепел и мел, вводились добавки волластонита Босагинского месторождения (Казахстан) в количестве 3 и 6 % сверх 100 %.

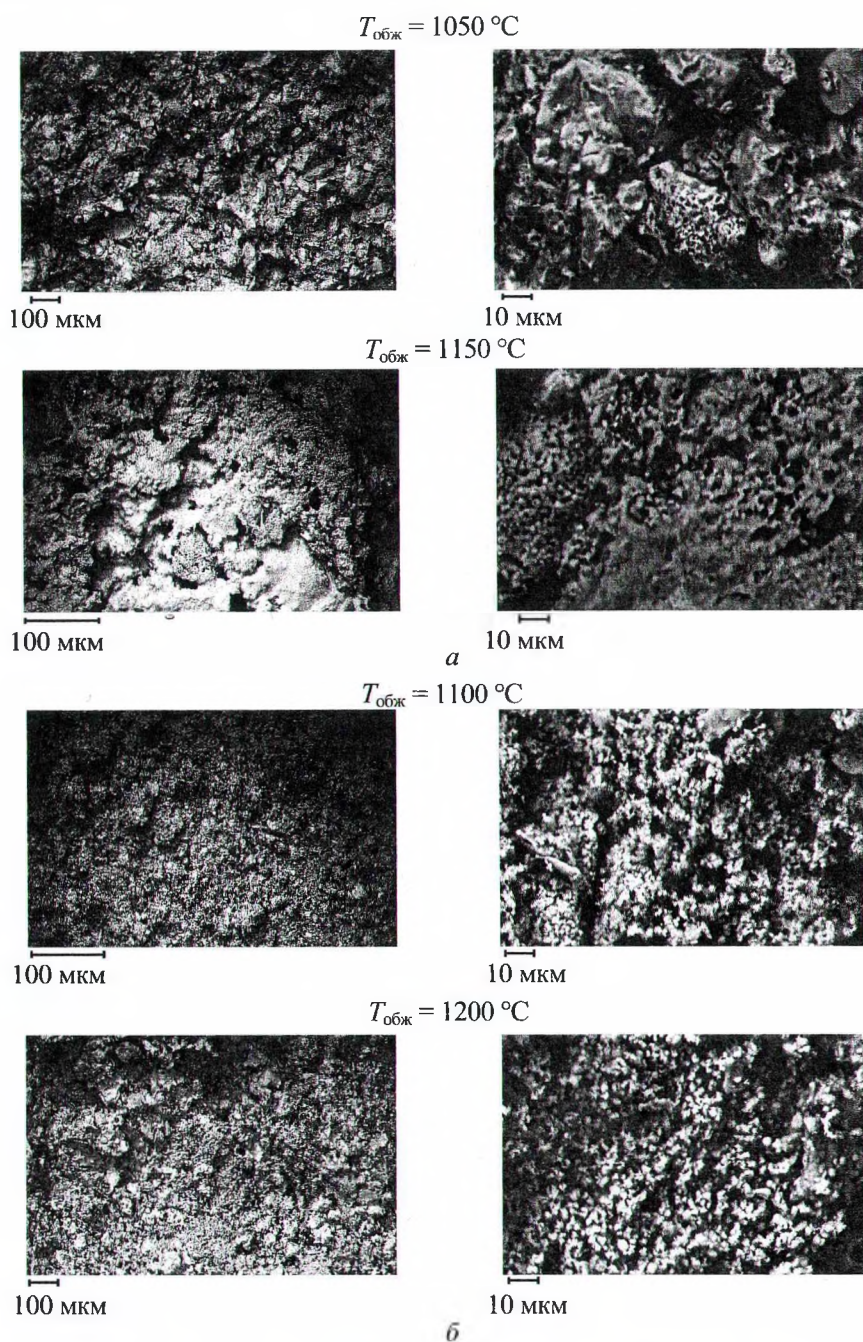


Рис. 2. Влияние природы кремнийсодержащих компонентов на формирование структуры керамики

основные компоненты керамической массы: а – трепел и мел; б – маршалит и мел;  $\times 100$  – слева;  $\times 1000$  – справа

Таблица 3

Характеристика силикатов и алюмосиликатов кальция (PDF-2 – ICDD)

Минерал	Сингония, форма кристаллов [15]	Пространственная группа	Z	Параметры элементарной ячейки					
				a, Å	b, Å	c, Å	α, °	β, °	γ, °
Волластонит Ca[SiO <sub>3</sub> ]	Триклинная, таблитчатая	C-1	12	10,104	11,054	7,305	99,53	100,56	83,44
Псевдо-волластонит Ca <sub>3</sub> [SiO <sub>3</sub> ] <sub>3</sub>	Моноклиная, призматическая	C <sub>2</sub> /C	8	6,8394	11,8704	19,6313	–	90,667	–
Ларнит Ca <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ]	Моноклиная, округлая	P2 <sub>1</sub> /n	4	5,5019	6,7624	9,3387	–	94,144	–
Геленит Ca <sub>2</sub> [Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> ]	Тетрагональная, короткопризматическая	P-42 <sub>1</sub> m	2 <sub>0</sub>	7,7173	–	5,086	–	–	–

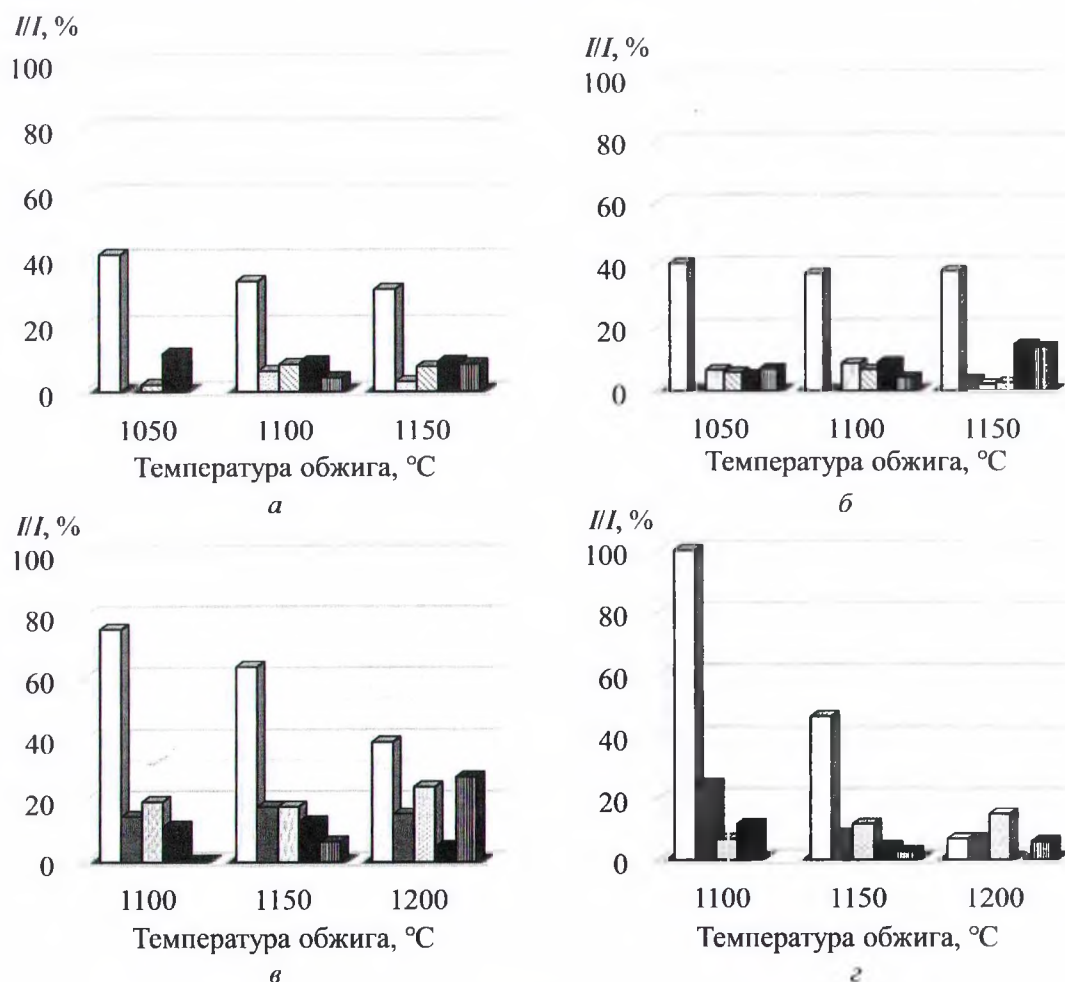


Рис. 3. Влияние природы кальций- и кремнийсодержащих компонентов на формирование фазового состава керамики

□ – β-кварц; ■ – β-кристобалит; ▨ – ларнит; ▩ – геленит; ■ – волластонит; ▨ – псевдоволластонит; основные компоненты керамической массы: а – трепел и мел; б – трепел и известь; в – маршаллит и мел; г – маршаллит и известь;  $I/I_0$  – относительная интенсивность

Предполагалось, что указанный минерализатор будет выполнять роль искусственного центра кристаллизации. Усредненный химический состав волластонита Босагинского месторождения следующий (массовое содержание, %): 53,42 SiO<sub>2</sub>; 0,60 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,89 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 42,24 CaO; 1,05 MgO; 0,13 Na<sub>2</sub>O; 0,13 K<sub>2</sub>O; 0,17 SO<sub>3</sub>; 1,37 – потери при прокаливании.

Установлено, что природный волластонит обеспечил увеличение степени спекания материала (рис. 4), поскольку данная добавка способствует снижению температуры образования расплава, повышению его количества, кроме того, Ca[SiO<sub>3</sub>] оказывает влияние на вязкость и коэффициент поверхностного натяжения расплава [17].

Отличительной особенностью структуры материалов, синтезированных с использованием минерализатора, является наличие выраженных дощатых кристаллов волластонита, причем наблюдается закономерное увеличение их количества с ростом содержания добавки (рис. 5, 6).

Благодаря габитусу кристаллов волластонита наблюдается армирование материала, что объясняет повышение механической прочности при увеличении содержания минерализатора (см. рис. 4, 5).

В материале также присутствуют зерна округлой формы, по внешним признакам напоминающие кристаллы β-кварца, а также призматические образования псевдоволластонита или геленита, что согласуется с данными рентгенофазового анализа (рис. 6).

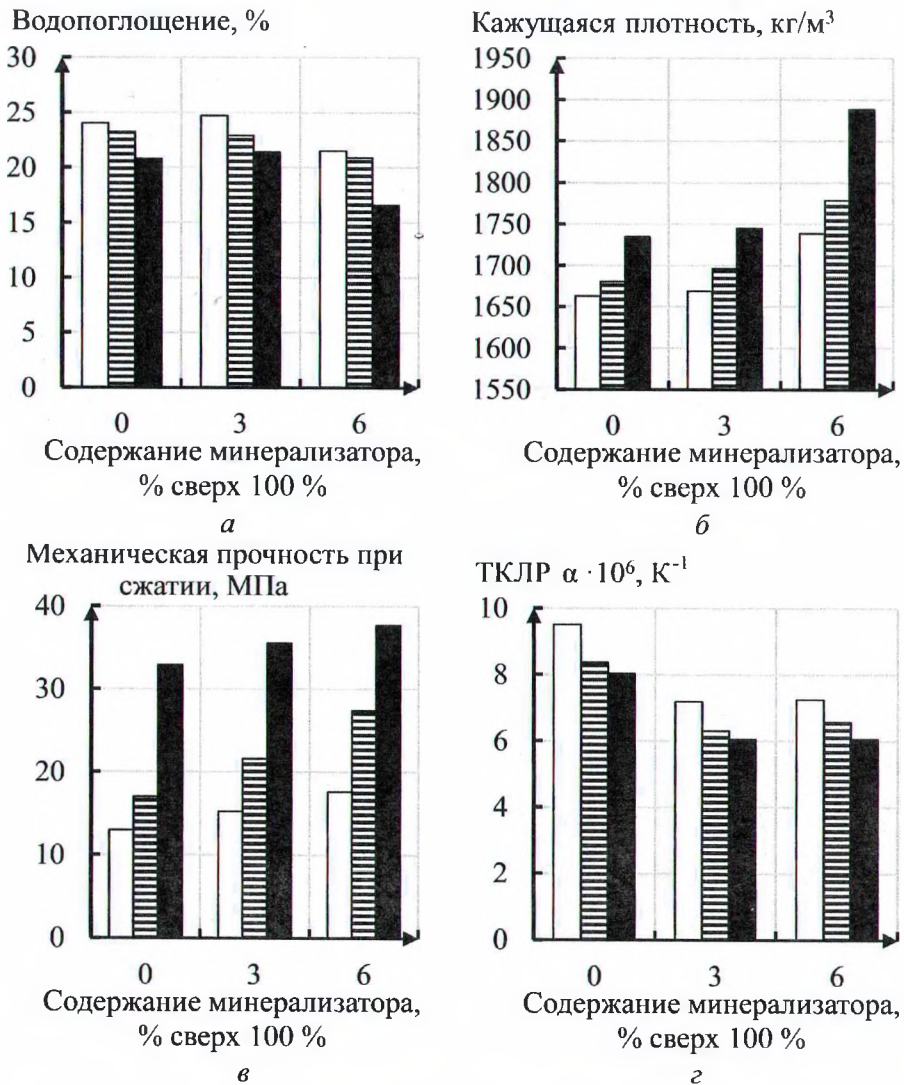


Рис. 4. Графики зависимости водопоглощения (а), кажущейся плотности (б), механической прочности при сжатии (в) и ТКЛР (г) от содержания добавки волластонита температура обжига, °C: □ – 1050; ▨ – 1100; ■ – 1150

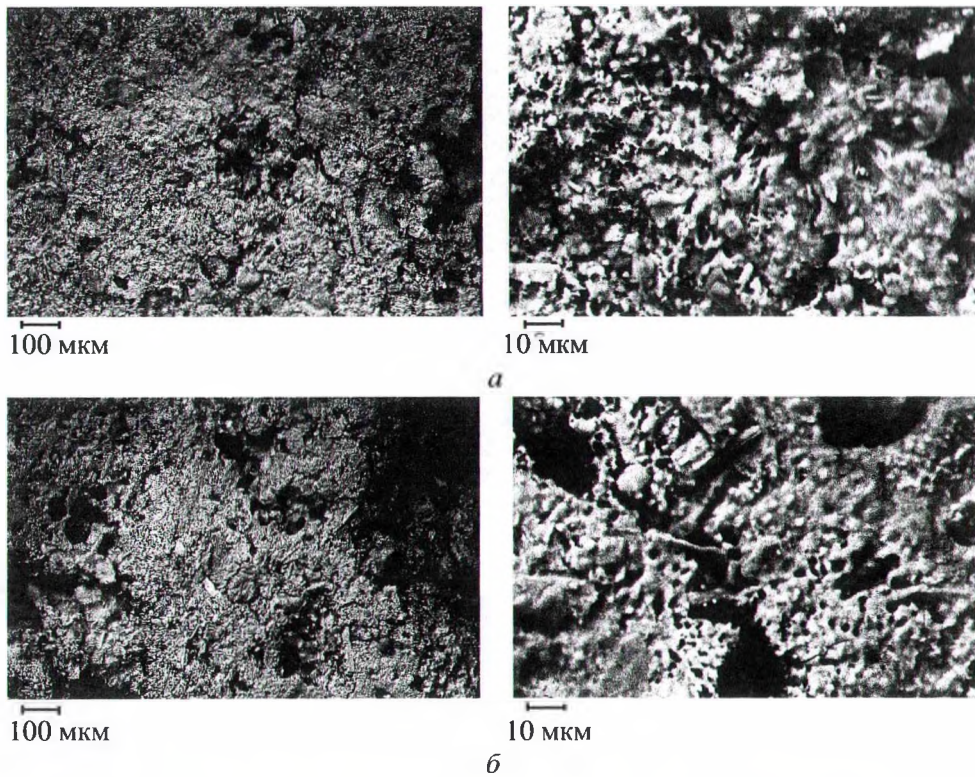


Рис. 5. Влияние добавки природного волластонита на формирование структуры керамики ( $T_{\text{обж}} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) содержание природного волластонита, % сверх 100 %: а – 3; б – 6;  $\times 100$  – слева;  $\times 1000$  – справа

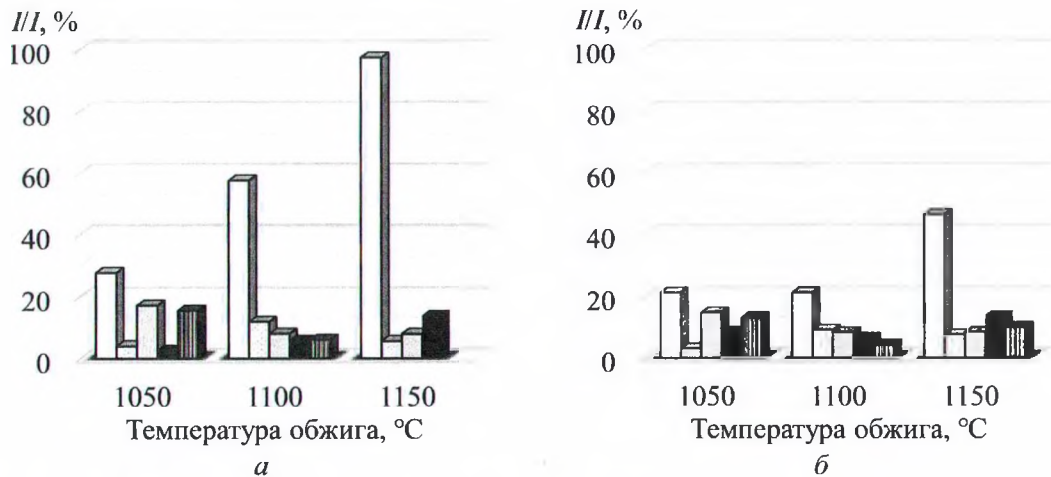


Рис. 6. Влияние добавки природного волластонита на формирование структуры керамики  
 □ – β-кварц; ▨ – ларнит; ▩ – геленит; ■ – волластонит; ▤ – псевдоволластонит;  
 содержание природного волластонита, % сверх 100 %: а – 3; б – 6

Анализ данных рентгенофазового анализа показывает, что введение минерализатора в состав керамических масс активизирует процесс формирования волластонита. При этом увеличение температуры обжига приводит к снижению содержания побочных кристаллических фаз (ларнита, геленита и β-кварца), что совместно с микротрещиноватой структурой материала (за счет

сложноорганизованного сочетания кристаллов различного габитуса и вследствие различия теплофизических характеристик кристаллических фаз) повышает термостойкость керамики.

Исследования термостойкости материалов, полученных с использованием минерализатора, свидетельствуют о том, что они выдерживают термоциклирование (нагрев до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждение



в воде) не менее 50 циклов, их теплопроводность составляет не более 0,25 Вт/(м·К).

Таким образом, в настоящем исследовании разработаны составы масс и технологические параметры получения волластонитсодержащей керамики на основе природного сырья Республики Беларусь, которое может быть использовано в качестве огнеупорного припаса на предприятиях Министерства промышленности Республики Беларусь.

### Список литературы

1. Волочко А. Т., Подболотов К. Б., Дятлова Е. М. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы. Минск: Беларус. навука, 2013. 385 с.
2. Матренин С. В., Слосман А. И. Техническая керамика. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
3. Афанасьева Н. И., Самигуллин Р. Р., Николаев К. Г. и др. Известково-кремнеземистое сырье для получения синтетического волластонита // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 5. С. 22 – 26.
4. Исаев В. А., Прасолов Д. С. Обоснование получения синтетического волластонита на Стойленском ГОКе из смеси мела и кварцевого песка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 9. С. 158 – 166.
5. Бобкова Н. М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Минск: Белорус. гос. технол. ун-т, 1997. 336 с.
6. Исламова Г. Г., Лыгина Т. З. Твердофазный синтез метасиликата кальция из природных кальциевых и кремнийсодержащих компонентов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 4. С. 37 – 40.
7. Ярусова С. Б., Черепанова М. В., Гордиенко П. С., Пушкар В. С. Синтез волластонита из природного диоксида кремния и техногенных отходов // Экология и промышленность России. 2012. № 2. С. 24 – 27. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-2-24-27>.
8. Исенов Д., Джакупова И. Б., Шарифканова Г. Н., Бажбанов А. Ж. Синтетический волластонит – как инновационный материал, переработанный из промышленных отходов // Вестник Алматинского технологического университета. 2018. № 2. С. 16 – 21.
9. Готлиб Е. М., Ха Т. Н. Ф. Получение синтетического волластонита на основе рисовой шелухи // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22, Вып. 7. С. 42 – 46.
10. Зулумян Н. О., Холькин А. И., Исаакян А. Р. и др. Влияние структурных особенностей кремнеземов, полученных из серпентинов, на синтез бета-волластонита // Тр. Кольского научного центра РАН. 2015. № 5(31). С. 350 – 353.
11. González-Bartos M. R., García-Ten J., Alonso-Jiménez A. Synthesis of wollastonite from diatomite-rich marls and its potential ceramic uses // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.05.002>.
12. Бурученко А. Е., Харук Г. Н., Сергеев А. А. Использование отсеков дробления известковых пород в керамическом производстве // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 22 – 27.
13. Волластонит: [Электронный ресурс]. Экологический портал Республики Беларусь. URL: <https://ecportal.gov.by/nedra/mineralno-syrevaya-baza/perspektivnye-poleznye-iskopaemye/vollastonit/> (дата обращения: 29.11.2022).
14. Голушко В. М., Козинец А. И., Надаринская М. А. и др. Трещины месторождения «Стальное» Хотимского района Могилевской области в кормлении молодняка крупного рогатого скота // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2013. № 3. С. 94 – 100.
15. Перепелицын В. А. Основы технической минералогии и петрографии. М.: Недра, 1987. 256 с.
16. Салахов А. М., Тагиров Л. Р. Структурообразование керамики из глин, формирующих при обжиге различные минеральные фазы // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 68 – 74.
17. Азаров Г. М., Майорова Е. В., Оборина М. А., Беляков А. В. Волластонитовое сырье и области его применения (обзор) // Стекло и керамика. 1995. № 9. С. 13 – 16.  
[Azarov G. M., Maiorova E. V., Oborina M. A., et al. Wollastonite raw materials and their applications (a review) // Glass Ceram. 1995. V. 52, No. 9. P. 237 – 240.]
18. Дятлова Е. М., Сергиевич О. А., Руба М. А. Синтез волластонитсодержащих керамических материалов технического назначения для предприятий машиностроительной отрасли // Огнеупоры и техническая керамика. 2019. № 6. С. 31 – 40.

Поступила в редакцию / Received 05.12.2022

Принята к публикации / Accepted 20.03.2023

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.  
**Financing.** The study was not sponsored.

### Сведения об авторах / Information about authors

**Ростислав Юрьевич Попов** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь.

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

**E-mail:** rospopov@mail.ru. **SPIN РИНЦ:** 6046-0842

**Евгения Михайловна Дятлова** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь.

**Evgenia M. Dyatlova** – Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology, Ph.D., Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus.

**E-mail:** dyatlova@belstu.by. **SPIN РИНЦ:** 2028-6458

**Анна Николаевна Шиманская** – канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь.

**Hanna M. Shymanskaya** – Lecturer, Ph.D., 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

**Александра Сергеевна Самсонова** – аспирант кафедры технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Минск, Республика Беларусь.

**Aleksandra S. Samsonova** – postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology, Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk, Republic of Belarus.

**E-mail:** aleksasha\_samsonova97@mail.ru.



Спектр

Издательский дом

**В. Н. Данилов, Л. В. Воронкова**

## ПРОСТО О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ФАЗИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

ISBN 978-5-4442-0144-2.

Формат - 60x90 1/16, 136 страниц. Год издания - 2019, издание 1-е.



390 руб.

Практически без формул дается простое описание физических основ работы преобразователей с фазированными решетками (ПФР), доступное дефектоскопистам любого уровня подготовки, отмечаются особенности, отличающие ПФР от преобразователей с обычными (цельными) пьезопластинами, обращается внимание на преимущества и ограничения их применения. Рассматриваются особенности формирования сигнала прямого линейного ПФР и влияния ряда факторов на его характеристики, особенности формирования сигналов прямого и наклонного ПФР с линейными решетками при наличии акустической задержки, влияющей на их характеристики.

Рассматриваются особенности излучаемых и регистрируемых сигналов прямых ПФР с прямоугольной (двухмерной) решеткой с различным отношением размеров сторон. Показано влияние формы решетки на изменение амплитуды излучаемого ПФР-сигнала вдоль акустической оси, диаграмму направленности, зависимость амплитуды донного сигнала и др.

Приводятся некоторые результаты сравнения теоретических и экспериментальных характеристик ПФР и описываются особенности и возможности их практического применения при ультразвуковом контроле. Показано, что теоретические модели прямых и наклонных преобразователей с линейной фазированной решеткой в целом адекватно описывают работу ПФР. Приведен ряд примеров использования ПФР в практическом контроле, показывающих их особенности и реальные возможности.

Монография полезна для повышения квалификации специалистов по ультразвуковому методу контроля и как учебное пособие для студентов и аспирантов при изучении соответствующего курса.

119048, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. 000 «Издательский дом «Спектр»

Телефон отдела реализации: (495) 514-26-34. Дополнительный телефон офиса: (926) 615 17 16.

E-mail: zakaz@idspektr.ru. Http://www.ldspektr.ru