

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 1 / 2026, Vol. 9, Iss. 1 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 620.22-419

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-1

Сравнение эффективности использования золы рисовой шелухи для твердофазного синтеза волластонита и диопсида

¹ Соколова А.Г. *,

² Готлиб Е.М.,

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

² Казанский национальный исследовательский технологический университет,

* Ответственный автор E-mail: as.falconi@yandex.ru

Аннотация: цели: данное исследование ставит целью оценить перспективность использования золы рисовой шелухи для получения кальций-магниевого силиката и выявить различия процессов твердофазного синтеза волластонита и диопсида на основе золы рисовой шелухи.

Методы. Для анализа полученных образцов синтетического волластонита и диопсида использовали рентгенографический количественный фазовый анализ. Пористость кальций-магниевого силиката оценивали статическим волюметрическим способом по методу низкотемпературной адсорбции азота. Элементный состав образцов определяли с помощью энергодисперсионного детектора Oxford INCA X-max 80, электронно-микроскопический анализ проводили при помощи растрового микроскопа Jeol JSM7001F.

Результаты. Экспериментальные данные по сравнению свойств синтезированных диопсида и волластонита показали, что для волластонита характерна большая пористость и средний размер частиц, по сравнению с диопсидом ввиду более низкой температуры твердофазного синтеза. Структура синтетического волластонита отличается наличием крупных включений неправильной формы с небольшим количеством игольчатых частиц, у синтезированного диопсида игольчатые частицы отсутствуют, для включений характерен меньший размер и равномерное распределение по объему.

Выводы. При получении кальций-магниевого силиката методом твердофазного синтеза на основе золы рисовой шелухи выход конечного продукта синтетического диопсида существенно выше, чем синтетического волластонита. Процесс синтеза диопсида является менее трудоемким и продолжительным, но более энергозатратным в связи с более высокой температурой синтеза диопсида.

Ключевые слова: зола рисовой шелухи, доломит, кальцит, твердофазный синтез, волластонит, диопсид, технология

Для цитирования: Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Сравнение эффективности использования золы рисовой шелухи для твердофазного синтеза волластонита и диопсида // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 1. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-1

Поступила в редакцию: 7 августа 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 9 ноября 2025 г.; Принята к публикации: 6 января 2026 г.

Comparison of the effectiveness of rice husk ash for solid phase synthesis of wollastonite and diopside

¹ Sokolova A.G. *,

² Gotlib E.M.,

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering,

² Kazan National Research Technological University,

*Corresponding author E-mail: as.falconi@yandex.ru

Abstract: Objectives: This study aims to evaluate the prospects of using rice husk ash for the production of calcium-magnesium silicates and to identify differences in the solid-phase synthesis processes of wollastonite and diopside based on rice husk ash.

Methods. X-ray quantitative phase analysis was used to analyse the obtained samples of synthetic wollastonite and diopside. The porosity of calcium-magnesium silicates was evaluated by a static volumetric method using low-temperature nitrogen adsorption. The elemental composition of the samples was determined using an Oxford INCA X-max 80 energy dispersive detector, and electron microscopic analysis was performed using a Jeol JSM7001F scanning microscope.

Results. Experimental data comparing the properties of synthesized diopside and wollastonite showed that wollastonite is characterized by high porosity and average particle size compared to diopside due to the lower temperature of solid-phase synthesis. The structure of synthetic wollastonite is distinguished by the presence of large irregularly shaped inclusions with a small amount of needle-like particles, while synthesized diopside does not contain needle-like particles, and the inclusions are characterized by smaller size and uniform distribution throughout the volume.

Conclusions. When obtaining calcium-magnesium silicates by solid-phase synthesis based on rice husk ash, the yield of the final product synthetic diopside is significantly higher than that of synthetic wollastonite. The process of synthesizing diopside is less labor-intensive and time-consuming, but more energy-intensive due to the higher synthesis temperature of diopside.

Keywords: rice husk ash, dolomite, calcite, solidphase synthesis, wollastonite, diopside, technology

For citation: Sokolova A.G., Gotlib E.M. Comparison of the effectiveness of rice husk ash for solid phase synthesis of wollastonite and diopside. Chemical Bulletin. 2026. 9 (1). 1. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-1-1

The article was submitted: August 7, 2025; Approved after reviewing: November 9, 2025; Accepted for publication: January 6, 2026.

Введение

Волластонит (CaSiO_3) и диопсид ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) являются востребованными наполнителями [1-4] композиционных материалов на основе полимеров, глины, цемента и других связующих, которые находят все более широкое применение в различных отраслях экономики. Способы получения синтетического волластонита и диопсида, а также сырьевые материалы для синтеза этих кальций-магниевых силикатов разнообразны. Так, например, в 1972 году Джозеф Вурер запатентовал способ получения синтетического волластонита путем спекания смеси кремнезема и оксида кальция, соответственно, добавление в шихту оксида магния в мольном соотношении $\text{CaO}:\text{MgO} = 1:1$ приводило к получению синтетического диопсида.

В настоящее время для синтеза волластонита и диопсида применяют синтез после кристаллизации из расплава, твердофазовый синтез, синтез при спекании, гидротермальный метод и золь-гель метод [5]. Также известны способы получения высокопористой стеклокерамической пены с волластонитом и диопсидом в качестве кристаллических фаз путем термической обработки кремнийорганических смол, наполненных прекурсорами оксидов кальция и магния в виде микрочастиц [6].

Сырьевыми материалами для получения кальций-магниевых силикатов могут служить разнообразные соединения кальция и кремния, как природные образования, так и отходы химического и сельскохозяйственного производства, что связано с переходом на экономику замкнутого цикла и поиском альтернативных источников сырья. Так, в качестве кальцийсодержащих компонентов могут использоваться отход производства фосфорной кислоты – фосфогипс, отходы производства солода, известковые отходы производства сахара. Кремнийсодержащими сырьевыми материалами могут служить отходы производства белой сажи, фтористого алюминия, а также многотоннажный отход производства риса – зола рисовой шелухи.

Эффективность использования для синтеза кальций-магниевых силикатов золы рисовой шелухи установлена многими исследователями [7,8], в том числе и авторами данной работы [9, 10].

Целью данного исследования является оценка перспективности использования золы рисовой шелухи в качестве кремнийсодержащего компонента для твердофазного синтеза кальций-магниевых силикатов и определение различий в основных технологических параметрах процессов получения синтетического волластонита и диопсида на её основе, включая энергозатратность, продолжительность, трудоёмкость, а также выход, состав и качество целевого продукта.

Материалы и методы исследований

Кальций-магниевые силикаты – синтетический волластонит и диопсид – получали в лабораторных условиях при температуре 500 °С [10] из золы рисовой шелухи (ЗРШ), полученной методом твердофазного синтеза в муфельной печи, известняка (ГОСТ 26826-86) и доломита (ГОСТ 23682-2020). В качестве плавня использовали 5%-ную борную кислоту (ГОСТ 18704-78).

Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) синтезированных образцов проводили на компактном порошковом рентгеновском дифрактометре POWDIX 600/300 с вертикальной оптической схемой Брэгга-Брентано. Параметры съемки: шаг сканирования – 0,02, угловой интервал сканирования от 3 до 65°, прецизионная точность измерений до +/- 0.02° (2θ) (рис. 1).



Рис. 1. Рентгеновский порошковый дифрактометр POWDIX 600/300.

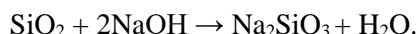
Fig. 1. X-ray powder diffractometer POWDIX 600/300.

Для оценки показателей пористости полученных кальций-магниевых силикатов статическим волюметрическим способом по методу низкотемпературной адсорбции азота использовали анализатор удельной поверхности и размера пор «TOP-200» производства Altamira Instruments, LLC. Для расчета удельной поверхности пор применяли стандартный метод БЭТ.

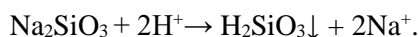
Растровый микроскоп Jeol JSM7001F применялся для электронно-микроскопического анализа полученных образцов синтетического волластонита и диопсида, элементный состав образцов определяли с помощью энергодисперсионного детектора Oxford INCA X-max 80.

Результаты и обсуждения

В промышленности кремнезем получают смешиванием силикатных растворов с избытком кислоты, промывкой и сушкой полученного продукта. Первый этап получения силикатов кальция с высоким содержанием волластонита представлял собой синтез диоксида кремния из золы рисовой шелухи (ЗРШ). Предварительная подготовка сырьевого материала включала щелочную обработку кремнезема, содержащегося в ЗРШ, раствором гидроксида натрия; ЗРШ замачивали при комнатной температуре в 12%-ном растворе NaOH в течение 1 суток (соотношение по объему ЗРШ : NaOH = 1 : 10) для протекания химической реакции кремнезёма с гидроксидом натрия по так называемому «мокрому способу» [11]:



Полученный раствор подвергали фильтрованию с последующим выпариванием. Для этого из раствора полученного силиката натрия Na_2SiO_3 сначала фильтрованием удаляли твёрдый остаток с преимущественным содержанием углерода [12]. Далее во избежание повторного растворения осадка отфильтрованный раствор доводили до значения pH=3 добавлением 12%-ного водного раствора HCl [13]:



В зависимости от способности аниона сорбироваться на поверхности кремнезема возможно наблюдать выпадение аморфного осадка (коагуляцию), образование геля (студня) переменного состава $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n > 2$), а также образование золя, сопровождаемое помутнением раствора. Выпавший осадок фильтровали дистиллированной водой до достижения $\text{pH}=7$, удалив остаточное количество ионов Na^+ и Cl^- . Сушка полученного твердого продукта производилась при температуре $100 \pm 5^\circ\text{C}$ в сушильном лабораторном шкафу в течение 1 суток до достижения постоянной массы [11].

Заключительная стадия получения кремнезема включала прокаливание гидратированного диоксида кремния $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ при температуре 550°C в лабораторной печи в течение 3 часов [12] (рис. 2).



Рис. 2. Схема получения диоксида кремния из рисовой шелухи.
Fig. 2. The scheme of production of silicon dioxide from rice husk ash.

Технологическая схема получения синтетического диоксида на основе известняка и ЗРШ представлена на рис. 3. Известняк CaCO_3 прокаливали в муфельной печи в течение 2 часов при температуре 900°C и смешивали его истиранием в шаровой мельнице с диоксидом кремния до частиц размером $0,5 \mu\text{м}$ [13]. На следующем этапе в полученную шихту добавлялась вода в количестве 20% масс. и проводилось термостаивание в течение 1 суток при температуре 350°C . Полученная масса прокаливалась при температуре 900°C в течение 3 часов и подвергалась истиранию в планетарной шаровой мельнице до достижения заданной степени дисперсности при скорости вращения 800 об./мин .

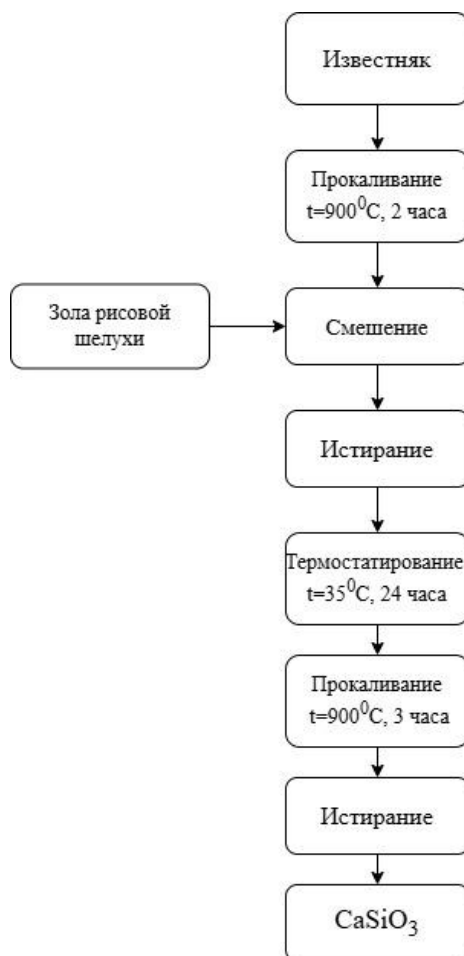


Рис. 3. Оптимальная схема получения синтетического волластонита из диоксида кремния на основе рисовой шелухи и известняка.

Fig. 3. The optimal scheme of obtaining synthetic wollastonite from silicon dioxide on the base of rice husk ash and limestone.

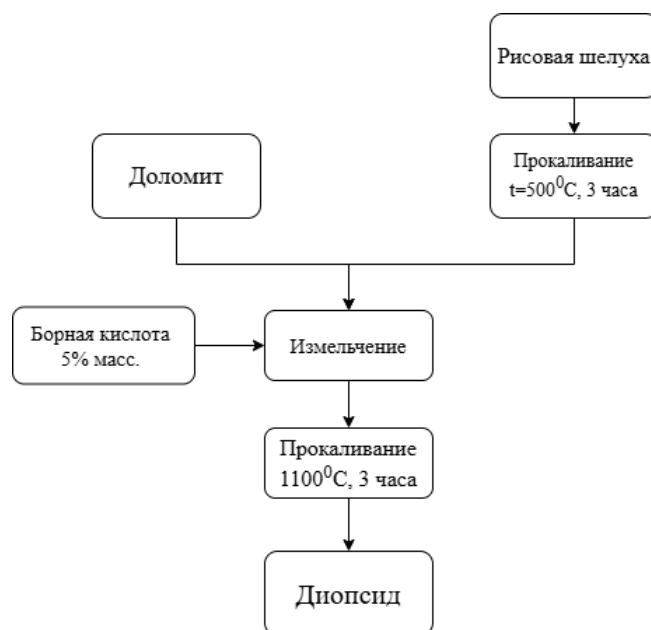


Рис. 4. Оптимальная схема получения синтетического диопсида на основе рисовой шелухи и доломита.

Fig. 4. The optimal scheme of obtaining synthetic diopside on the base of rice husk ahs and dolomite.

Синтезированный твердофазным методом при температуре 900 °С и соотношении $\text{SiO}_2 : \text{CaO} = 1:1,2$ наполнитель содержал 78 масс.% β -волластонита и 22 масс.% ларнита, который является примесным компонентом [14]. Образование ларнита (двукальциевого силиката) является, как известно [14], промежуточной стадией синтеза силикатов кальция.

Зависимость содержания β -волластонита от времени проведения твердофазного синтеза при соотношении $\text{SiO}_2 : \text{CaO} = 1:1,2$.

Таблица 1

Table 1

Dependency of β -wollastonite content on the solidphase synthesis duration at the ratio $\text{SiO}_2 : \text{CaO} = 1:1.2$.

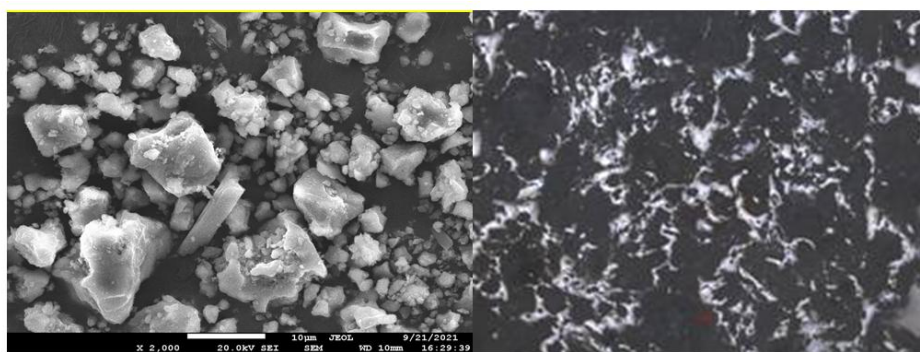
Продолжительность твёрдофазного синтеза, час.	Содержание β -волластонита, %
1	60
2	78
3	79

Степень кристалличности СВ экстремальным образом зависит от температуры твердофазного синтеза, о чём свидетельствуют данные табл. 1. Кристаллиты достигают максимальных размеров при 850-950°С, при этих же температурах синтезируемый СВ будет содержать наибольшее количество β -волластонита (табл. 1).

В то же время, для обеспечения оптимального состава кальций-магниевого силиката (КМС) с содержанием диоксида 97 масс. % [15], получаемого при соотношении ЗРШ : доломит = 1:1,8, необходима более высокая температура (1100°С) и применение плавня – борной кислоты. Хвостовыми компонентами синтезированного КМС. при этом, являются кристаллические диоксиды кремния - кристобалит и тридимит, которые образуются в результате полиморфных превращений аморфного диоксида кремния.

Твердофазная реакция синтеза диоксида протекает значительно проще, чем у волластонита (рис. 4), она не требует предварительного получения диоксида кремния, а также увлажнения и термостатирования исходной шихты.

Анализ электронно-микроскопических снимков показал, что структура синтетического волластонита зернистая, пористая, с крупными включениями неправильной формы. Синтезированный волластонит характеризуется небольшим количеством частиц игольчатой формы (рис. 5а). В то же время, у синтетического диоксида игольчатые частицы отсутствуют (рис. 5б), включения имеют значительно меньший размер и распределяются более равномерно в объеме образца.



(а)

(б)

Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки синтетических волластонит – (а) и диопсид-содержащих (б) наполнителей (увеличение 1000х).

Fig. 5. Electron micrographs of synthetic wollastonite- (a) and diopside-containing (b) fillers (resolving power of microscope 1000x).

Таблица 2

Средний размер частиц и удельная поверхность пор синтезированных силикатов.

Table 2

The mean size of particles and specific pores surface of synthesized silicates.

№ п/п	Тип наполнителя	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность пор по БЭТ, м ² /г
1.	СД	1,5	0,6
2.	СВ	13,7	17,9

Синтетический волластонит, по сравнению с диопсидом, отличается значительно большей пористостью и средним размером частиц (табл. 2) вследствие более низкой температуры твердофазного синтеза.

Действительно, размер частиц получаемого продукта при сплавлении компонентов в процессе твердофазного синтеза определяется скоростью и направлением отвода тепла, температурой реакции и содержанием примесей [16]. Теплопроводность волластонита ниже, чем диопсида, и это может вносить свой вклад в больший размер его частиц.

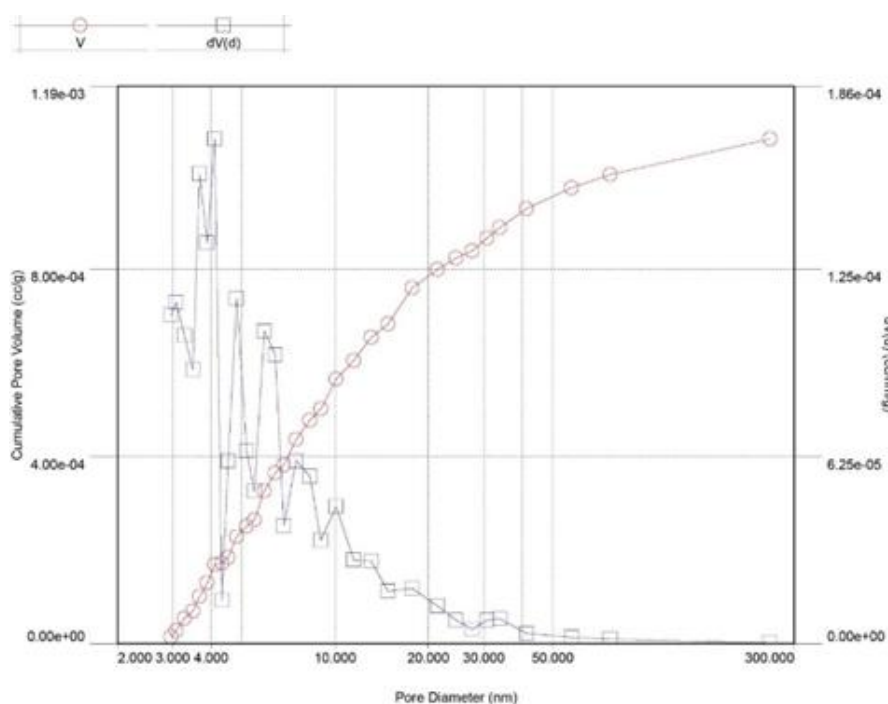


Рис. 6. Распределение пор синтетического диопсида по размерам по методу ВЖ.

Fig. 6. Pore size distribution of synthetic diopside under the VJH method.

Средний размер пор у СД сопоставим по значениям с синтетическим волластонитом (рис. 6), в то же время удельная поверхность пор по БЭТ и общий объем пор у СД существенно ниже, чем у СВ, что связано с более высокой температурой твердофазного синтеза.

Кроме того, синтез волластонита проходит через образование ларнита, который имеет более низкую теплопроводность, чем фортесит, промежуточный продукт при получении диопсида.

Определенную роль играет и большая пористость волластонита, что делает возможным проникновение в его поры компонентов шихты при обжиге. На первом этапе производили декарбонизацию кальций и магниевых карбонатов [17]. При этом, температура разложения углекислого кальция составляла 890-900 °С, а углекислого магния порядка 570-750 °С [17,18]. Следует отметить, что распад карбонатов сопровождается значительными потерями массы до 27 % [15].

Реакции твердофазных диссоциаций карбонатов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Химические реакции твердофазных диссоциаций карбонатов.

Table 3

Chemical reactions of carbonates solidphase dissociations.

Температурный интервал	Химическая реакция твердофазных диссоциаций
570-750 °С	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 \uparrow$
700-800°С	$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \rightarrow (CaCO_3 + MgO) + CO_2 \uparrow$
800-900°С	$[CaCO_3 + MgO] \rightarrow (CaO + MgO) + CO_2 \uparrow$
890-900 °С	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$

В то же время, поскольку температура начала синтеза диопсида на 100°С выше (900 °С), чем волластонита (800 °С), декарбонизация доломита успевает пройти полностью до начала получения диопсида. Для карбоната кальция процессы образования β-волластонита и декарбонизации протекают параллельно, что обуславливает необходимость предварительной декарбонизации известняка при получении волластонита.

Синтез диопсида из доломита и золы рисовой шелухи включает в себя фазу образования монтichelита $CaMgSiO_4$ с последующим выделением форстерита Mg_2SiO_4 [15].

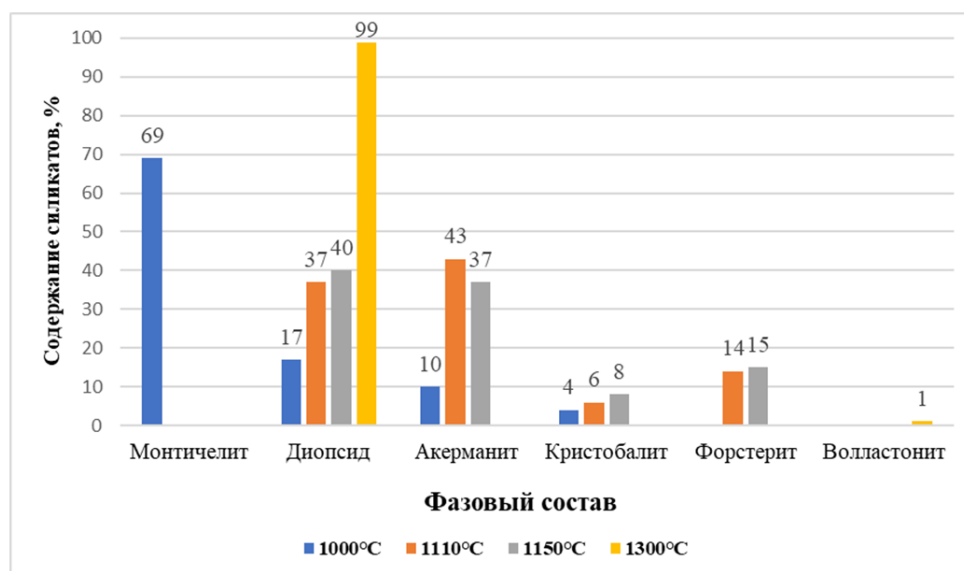


Рис. 7. Результаты рентгенофазового анализа.

Fig. 7. The results of X-ray diffraction analysis.

При выдержке в течение 3 часов при температуре 1100°С в присутствии борной кислоты как регулятора вязкости шихты, обеспечивающего достаточную скорость диффузии компонентов при сплавлении [19], происходит переход всех ранее образованных силикатов в диопсид, что подтверждают результаты рентгенофазового анализа (рис. 7).

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что продукты твердофазного синтеза золы рисовой шелухи с карбонатами максимальное содержание диопсида заметно выше (в 1,25 раз), чем волластонита [20].

Оптимальный фазовый состав силикатов в обоих случаях достигается при избытке карбонатов в исходной шихте, причем значительно большем (в 1,5 раза) при твердофазном синтезе диопсида. Данный эффект можно объяснить более низкой температурой разложения углекислого магния и относительно высокой потерей массы при этом процессе.

При этом, технология твердофазного синтеза диопсида включает только одну предварительную стадию прокалывания рисовой шелухи, специальная обработка исходной шихты не требуется и исключает использование токсичных кислот. Длительность технологического процесса сокращается практически на 30 часов. Из недостатков метода следует отметить более высокую энергозатратность ввиду более высокой температуры синтеза (выше на 200°С), в том числе и при использовании плавня.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в продуктах реакции твердофазного синтеза, при получении кальций-магниевого силиката на основе золы рисовой шелухи, выход конечного продукта синтеза – диопсида существенно выше, чем волластонита. Также, процесс синтеза диопсида содержит меньшее количество операций и, соответственно, является менее продолжительным и трудоемким. В то же время, температура синтеза диопсида выше на 200 °С, даже при использовании плавня, что позволяет сделать вывод о более высокой энергозатратности данного метода.

Список источников

1. Верещагин В.И., Меньшикова В.К., Бурученко А.Е., Могилевская Н.В. Керамические материалы на основе диопсида // *Стекло и керамика*. 2010. № 11. С. 13 – 16.
2. Данилова С.Н., Ярусова С.Б., Буравлев И.Ю., Слепцова С.А., Игнатъева Е.Г., Ягофаров В.Ю., Годиенко П.С., Охлопкова А.А. Модифицирование СВМПЭ волластонитом, синтезированным из отходов борного производства // *Полимерные материалы и технологии*. 2021. Т. 7. № 1. С. 71 – 82. <https://doi.org/10.3390/ma8052480>
3. Коробщикова Т.С., Орлова Н.А. Исследование гранулометрического состава волластонита Синюхинского месторождения и его влияния на свойства наполненных полимерных композиций // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2010. № 5. С. 26 – 29.
4. Карионова Н.П., Вакалова Т.В. Процессы твердофазного синтеза волластонита на основе природного и техногенного сырья // *Новые огнеупоры*. 2009. № 1. С. 18 – 225.
5. Bozadjiev L., Doncheva L. Method for Diopside Synthesis // *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 2006. № 41 (2). P. 125 – 128.
6. Fiocco L., Elsayed H., Ferroni L., Bernardo E. Bioactive Wollastonite-Diopside Foams from Preceramic Polymers and Reactive Oxide Fillers // *Materials*. 2015. № 8 (5). P. 2480 – 2494. <https://doi.org/10.3390/ma8052480>
7. Hamisah I., Roslinda S., Muhammad A.H., Azman J. Synthesis and Characterization of Nano – Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 756. № 5. P. 27 – 34. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43>
8. Srinath P.A., Azeem P.V., Reddy K., Chiranjeevi P.B., Prasada R.R. A novel cost-effective approach to fabricate diopside bioceramics for orthopedic applications // *Advanced powder technology*. 2021. Vol. 32. № 3. P. 875 – 884. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.01.038>
9. Готлиб Е.М., Твердов И.Д., Ямалеева Е.С., Ха Т.Н.Ф. Оптимизация температуры получения синтетического волластонита на базе рисовой шелухи // *Бутлеровские сообщения*. 2020. Т. 63. № 8. С. 18 – 23. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/20-63-8-18>
10. Tverdov I.D., Dutova V.S., Gotlib E.M., Galimov E.R. Wollastonite and diopside containing fillers of epoxy polymers based on carbonized rice // *Proceedings of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – Reports in English*. P.119-124 (November 6, 2024 Beijing, PRC). ISBN 978-5-905695
11. Pham T.K., Tran T.T.L., Pham T.L.T., Tran P.Q.N., Nguyen H.T., Mohd M.A.B.A. A Novel Study on Using Vietnam Rice Husk Ash and Cullet as Environmental Materials // *MATEC Web of Conferences* 97. 2017. Vol. 97. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701118>
12. Le V.H., Thuc C.N.H., Thuc H.H. Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol – gel method // *Nanoscale Res Lett* 8. 2013. Vol. 58. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-58>
13. Ха Тхи Нья Фьонг Эпоксидные композиции, наполненные природным волластонитом и синтетическим силикатом кальция на основе золы рисовой шелухи, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2021. 156 с.
14. Готлиб Е.М., Фьонг Ха Получение синтетического волластонита с использованием рисовой шелухи // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22. № 7. С. 42 – 46.
15. Твердов И.Д., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Холин К.В., Султанов Т.П. Изучение фазовых превращений в процессе твердофазного синтеза диопсида на основе золы рисовой шелухи // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ)*. 2024. Т. 86. № 2. С. 277 – 283. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-2-277-283>
16. Соболев Б.М., Куриный В.В., Марьин С.Б. Основы технологии получения металлов и сплавов (получение железа, чугуна и стали): учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ». 2014. 168 с.

17. Gotlib E.M., Ha Thi Nha Phuong, Nguyen Thi Thanh Huyen, Tran, Thi Phuong, Tran Thi Thanh Thao Tổng hợp wollastonite trên cơ sở tro trấu ứng dụng làm chất độn trong nhựa epoxy và một số tính chất của chúng // Journal analytical sciences. 2022. Vol. 27. № 1.

18. Соколова А.Г., Габдулхаев К.Р., Готлиб Е.М. Свойства и фазовый состав силикатных наполнителей, полученных на основе различных продуктов переработки рисовой шелухи // Пожаровзрывобезопасность. 2025. Т. 34. № 1. С. 32 – 39. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.32-39>

19. Твердов И.Д., Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Влияние содержания борной кислоты на фазовый состав кальций-магниевого силиката на основе карбонизированной рисовой шелухи // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 2. С. 24 – 27.

20. Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Синтетический волластонит и диопсид на основе золы рисовой шелухи как наполнители эпоксидных композиционных материалов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2025. № 3 (53). С. 34 – 42.

References

1. Vereshchagin V.I., Menshikova V.K., Buruchenko A.E., Mogilevskaya N.V. Ceramic materials based on diopside. Glass and ceramics. 2010. No. 11. P. 13 – 16.

2. Danilova S.N., Yarusova S.B., Buravlev I.Yu., Sleptsova S.A., Ignatieva E.G., Yagofarov V.Yu., Godienko P.S., Okhlopko A.A. Modification of UHMWPE with wollastonite synthesized from boron production waste. Polymer materials and technologies. 2021 Vol. 7. No. 1 P. 71 – 82. <https://doi.org/10.3390/ma8052480>

3. Korobshchikova TS, Orlova NA Study of the granulometric composition of wollastonite from the Sinyukhinskoye deposit and its influence on the properties of filled polymer composites. Paints and varnishes and their application. 2010. No. 5. P. 26 – 29.

4. Karionova NP, Vakalova TV Processes of solid-phase synthesis of wollastonite based on natural and technogenic raw materials. New refractories. 2009. No. 1. P. 18 – 225.

5. Bozadjiev L., Doncheva L. Method for Diopside Synthesis. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy. 2006. No. 41 (2). P. 125 – 128.

6. Fiocco L., Elsayed H., Ferroni L., Bernardo E. Bioactive Wollastonite-Diopside Foams from Preceramic Polymers and Reactive Oxide Fillers. Materials. 2015. No. 8 (5). P. 2480 – 2494. <https://doi.org/10.3390/ma8052480>

7. Hamisah I., Roslinda S., Muhammad A.H., Azman J. Synthesis and Characterization of Nano-Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone. Materials Science Forum. 2013. Vol. 756. No. 5. P. 27 – 34. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43>

8. Srinath P.A., Azeem P.V., Reddy K., Chiranjeevi R.V., Prasada R.R. A novel cost-effective approach to fabricate diopside bioceramics for orthopedic applications. Advanced powder technology. 2021. Vol. 32. No. 3. P. 875 – 884. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.01.038>

9. Gottlieb E.M., Tverdov I.D., Yamaleeva E.S., Kha T.N.F. Optimization of the temperature for producing synthetic wollastonite based on rice husk. Butlerov Communications. 2020. Vol. 63. No. 8. P. 18 – 23. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/20-63-8-18>

10. Tverdov I.D., Dutova V.S., Gotlib E.M., Galimov E.R. Wollastonite and diopside containing fillers of epoxy polymers based on carbonized rice. Proceedings of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – Reports in English. P. 119 – 124 (November 6, 2024 Beijing, PRC). ISBN 978-5-905695

11. Pham T.K., Tran T.T.L., Pham T.L.T., Tran P.Q.N., Nguyen H.T., Mohd M.A.B.A. A Novel Study on Using Vietnam Rice Husk Ash and Cullet as Environmental Materials. MATEC Web of Conferences 97. 2017. Vol. 97. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701118>

12. Le V.H., Thuc C.N.H., Thuc H.H. Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol – gel method. Nanoscale Res Lett 8. 2013. Vol. 58. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-58>

13. Ha Thi Nha Phuong Epoxy composites filled with natural wollastonite and synthetic calcium silicate based on rice husk ash, Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, 2021. 156 p.

14. Gotlib E.M., Phuong Ha Production of synthetic wollastonite using rice husk. Bulletin of the Technological University. 2019. Vol. 22. No. 7. P. 42 – 46.

15. Tverdov I.D., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Kholin K.V., Sultanov T.P. Study of phase transformations in the process of solid-phase synthesis of diopside based on rice husk ash. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET). 2024. Vol. 86. No. 2. P. 277 – 283. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-2-277-283>

16. Sobolev B.M., Kuriny V.V., Maryin S.B. Fundamentals of the technology of producing metals and alloys (production of iron, cast iron, and steel): a tutorial. Komsomolsk-on-Amur: FGBOU HPE “KnAGTU”. 2014. 168 p.

17. Gotlib E.M., Ha Thi Nha Phuong, Nguyen Thi Thanh Huyen, Tran, Thi Phuong, Tran Thi Thanh Thao Tổng hợp wollastonite trên cơ sở tro trấu ứng dụng làm chất độn trong nhựa epoxy và một số tính chất của chúng. Journal analytical sciences. 2022. Vol. 27. No. 1.

18. Sokolova A.G., Gabdulkaev K.R., Gotlib E.M. Properties and phase composition of silicate fillers obtained on the basis of various rice husk processing products. Fire and explosion safety. 2025. Vol. 34. No. 1. P. 32 – 39. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.32-39>

19. Tverlov I.D., Sokolova A.G., Gotlib E.M. Effect of boric acid content on the phase composition of calcium-magnesium silicates based on carbonized rice husk. Forging and stamping production. Material pressure processing. 2025. No. 2. P. 24 – 27.

20. Sokolova A.G., Gotlib E.M. Synthetic wollastonite and diopside based on rice husk ash as fillers for epoxy composite materials. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2025. No. 3 (53). P. 34 – 42.

Информация об авторах

Соколова А.Г., кандидат технических наук, доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8425-1883>, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, as.falconi@yandex.ru

Готлиб Е.М., доктор технических наук, профессор, ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1666-8702>, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68, egotlib@yandex.ru

© Соколова А.Г., Готлиб Е.М., 2026

Information about the authors

Sokolova A.G., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8425-1883>, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, as.falconi@yandex.ru

Gotlib E.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1666-8702>, Kazan National Research Technological University, 68 Karl-la-Marx St., Kazan, 420015, egotlib@yandex.ru

© Sokolova A.G., Gotlib E.M., 2026