Оригинальная статья

УДК 691:678.686

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-34-42

СИНТЕТИЧЕСКИЙ ВОЛЛАСТОНИТ И ДИОПСИД НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ КАК НАПОЛНИТЕЛИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2025 г. А. Г. Соколова[1], Е. М. Готлиб[2]

[1]**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет** (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26)

[2]**Казанский национальный исследовательский технологический университет** (Россия, 420015, Республика Татарстан, Казань, ул. Карла Маркса, 68)

Аннотация. Природные волластонит и диопсид являются уникальными наполнителями для создания эффективных полимерных композитных материалов с улучшенными механическими свойствами. Ввиду их высокой стоимости и дефицитности на отечественном рынке, актуально получение данных кальций-магниевых силикатов (КМС) путем твердофазного синтеза из недорогого сырья (сельскохозяйственных многотоннажных отходов рисового производства). Были изучены фазовый состав и свойства синтетических волластонита и диопсида, а также оценено их влияние на эксплуатационные свойства наполненных эпоксидных материалов. Проведены исследования по определению фазового состава, пористости, кислотно-основных свойств синтезированных наполнителей, оценено влияние данных характеристик на эксплуатационные свойства наполненных эпоксидных композиций. По своему фазовому составу синтетические волластонит и диопсид существенно отличаются. Синтетический волластонит в качестве побочной фазы содержит ларнит. По сравнению с диопсидом он обладает значительно большей удельной поверхностью пор и на порядок больший общий объем пор из-за более низкой температуры его твердофазного синтеза и примесей кристаллических диоксидов кремния. Было установлено, что наполнение силикатами приводит к образованию более организованной структуры полимерной матрицы. Полученные кальций-магниевые силикаты представляют собой эффективные наполнители композитных эпоксидных материалов, присутствие которых в композиции обеспечивает повышенную твердость, адгезионную прочность, износостойкость, снижают коэффициент статического трения, то есть улучшают трибологические свойства наполненных эпоксидных материалов, которые могут быть успешно применены в машиностроении.

Ключевые слова: эпоксидные композиции, фазовый состав, твердость, износостойкость, коэффициент трения, пористость, синтетический волластонит, диопсид

Для цитирования: 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);34–42. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-34-42*

Original article

SYNTHETIC WOLLASTONITE AND DIOPSIDE ON THE BASE OF RICE HUSK ASH AS FILLERS OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS

© 2025 A. G. Sokolova[1], E. M. Gotlib[2]

[1]**National Research Moscow State University of Civil Engineering** (26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

[2]**Kazan National Research Technological University** (68 Karl Marx street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015 Russian Federation)

Abstract. Natural wollastonite and diopside are unique fillers for the construction of efficient polymer composite materials with improved mechanical properties. Due to their high cost and scarcity in the domestic market, it is important to obtain these calcium-magnesium silicates (KMS) by solid-phase synthesis from inexpensive raw materials (agricultural high-tonnage rice production waste). The phase composition and properties of synthetic wollastonite and diopside were studied, and their effect on the performance properties of filled epoxy materials was evaluated. Studies have been conducted to determine the phase composition, porosity, and acid-base properties of synthesized fillers, and the effect of these characteristics on the performance properties of filled epoxy compositions has been evaluated. Synthetic wollastonite and diopside differ significantly in their phase composition. Synthetic wollastonite contains larnite as a side phase. Compared with diopside, it has a significantly larger specific pore surface and an order of magnitude larger total pore volume due to the lower temperature of its solid-phase synthesis and impurities of crystalline silicon dioxides. It was found that filling with silicates leads to the formation of a more organized polymer matrix structure. The obtained calcium-magnesium silicates are effective fillers of composite epoxy materials, the presence of which in the composition provides increased hardness, adhesive strength, wear resistance, reduces the coefficient of static friction, that is, improves the tribological properties of filled epoxy materials, which can be successfully used in mechanical engineering.

Keywords: epoxy composites; phase composition; hardness; wear resistance; friction coefficient; porosity; synthetic wollastonite; diopside

For citation: Sokolova A.G., Gotlib E.M. Synthetic wollastonite and diopside on the base of rice husk ash as fillers of epoxy composite materials. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):34–42. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-34-42*

Введение

Волластонит- и диопсид-содержащие наполнители представляют интерес для производства строительной, радиотехнической, электроизоляционной продукции, санитарных изделий и биокерамики, а также широко применяются при производстве сухих строительных смесей и полимерных композитов [1 – 3]. Природный силикат кальция ($CaSiO_3$) волластонит содержит повторяющиеся и переплетающиеся тройные четырехгранники кварца, которые формируют цепочки, соединяющиеся через кальций по сторонам, образуя тем самым восьмигранники. При такой структуре волластонит обладает высокой твердостью и прочностью, что делает его эффективным материалом для многих промышленных приложений.

Диопсид ($CaMgSi_2O_6$) – минерал группы пироксенов, обладающий рядом уникальных физико-химических свойств, что позволяет использовать его в качестве декоративного камня для облицовки стен и пола, в металлургической и стекольной промышленности для защиты оборудования от высоких температур, в машиностроении и металлообработке в качестве абразивов для шлифовки и полировки различных поверхностей.

Ввиду ограниченности месторождений рассматриваемых кальций-магниевых силикатов (КМС) в России в Приморском крае и Свердловской области, сложности их добычи, высокой стоимостной составляющей транспортной логистики представляется целесообразным синтез КМС из недорогого и доступного местного сырья, в том числе отходов промышленности [4].

Использование в качестве источника аморфного оксида кремния SiO_2 рисовой шелухи (многотоннажный отход рисового производства) представляет несомненный интерес для исследователей в области материаловедения [5]. Ежегодно в мире образуется около 600 млн т отходов обмолота риса, загрязняющих окружающую

среду. Аморфный кремнезем в составе рисовой шелухи обладает высокой химической стабильностью, низкой растворимостью, биологической инертностью, обладая при этом микродисперсной структурой, что делает ее высоко эффективным наполнителем композитных материалов.

Сжигание рисовой шелухи позволяет получить тепловую энергию, которую можно использовать для обогрева помещений или генерации электричества. В золе рисовой шелухи (ЗРШ) содержится порядка 16 – 18 % SiO_2, она не распадается в земле, что делает ее переработку актуальной.

Синтетические волластонит и диопсид, полученные методом твердофазного синтеза, перспективно применять для наполнения эпоксидных полимеров, так как эффективными компонентами композиционных материалов на их основе являются силикаты разного фазового состава [6; 7]. Твердофазный синтез является предпочтительным методом ввиду меньших энергозатрат и отсутствия негативного воздействия на окружающую среду.

Несмотря на большое количество научных работ, посвященных модификации полимерных материалов волластонитом и диопсидом [7; 8], систематические исследования влияния их фазового и гранулометрического состава, пористости и других свойств на оказываемый им модифицирующий эффект ограничены.

Целью настоящей работы является изучение фазового состава, пористости, кислотно-основных свойств синтетических волластонита, а также оценка их влияния на эксплуатационные свойства наполненных эпоксидных материалов.

Методы и принципы исследования

Синтез кальций магниевых силикатов проводили в электрической лабораторной муфельной печи методом твердофазного синтеза из рисовой шелухи, полученной обжигом при температуре 500 °С, доломита для стекольной промышленности (СД) (ГОСТ 23672 – 2020) и известняка (ГОСТ 26826 – 86). В качестве плавня при получении СД была использована 5 %-ная борная кислота (ГОСТ 18704 – 78).

Синтетический волластонит (СВ) получали изотермической выдержкой компонентов при температурах 900 и 1100 °С в течение 3 ч.

В качестве связующего для получения композиционных полимерных материалов, наполняемых СД и СВ, была использована эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 (ГОСТ 10587 – 84), отвержденная аминоалкилфенолом АФ-2 (ТУ 2494-052-00205423 – 2004) при комнатной температуре в течение 7 сут.

Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) исследуемых образцов синтезированных наполнителей проводили на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab. Параметры съемки: угловой интервал от 3 до 6°; шаг сканирования 0,02.

Удельную площадь поверхности пор исследуемых наполнителей оценивали по адсорбции газа по методу Брунауэра, Эммпета и Теллера (метод BET – ISO 9277:2010) на приборе Quantachrome Nova 1200e.

Элементный состав образцов наполнителей КМС проводили на растровом микроскопе Jeol JSM7001F, оборудованном энергодисперсионным детектором Oxford INCA X-max 80.

Силикаты дегазировали при температуре 150 °С в течение 3 ч при давлении в вакууме 2 Па. Величину *p*H водных суспензий образцов синтезированных наполнителей определяли на комбинированном измерителе SevenMulti, оборудованном датчиком pH InLab ExpertPro в соответствии с ГОСТ 22567.5 – 93.

Износостойкость образцов эпоксидных материалов оценивали на вертикальном оптиметре ИЗВ-1. Адгезию эпоксидных покрытий оценивали методом отрыва от стали в соответствии с ГОСТ 32299 – 2013 на аппарате Shimadzu AG-50 kNX. Коэффициент трения определяли на автоматизированной машине Tribometer, CMS Instruments, Швейцария (ASTM G99-959). Параметры испытания были следующие: температура 25 °С; влажность 20 %; линейная скорость 8,94 см/с; частота выборки 10 Гц.

Основные результаты

Фазовый состав и кислотно-основные свойства наполнителей представлены в табл. 1. Полученный на основе золы рисовой шелухи и известняка силикат содержит преимущественно β-волластонит (78 %) и ларнит в качестве примеси (22 %). β-волластонит представляет собой экологически безопасный неорганический полимер исключительной белизны с высокими химической и термической стойкостью, температурой плавления, сниженной теплопроводностью, который не взаимодействует с абсолютным большинством химических реагентов. Благодаря перечисленным свойствам, он является материалом многоцелевого назначения, а игольчатая форма частиц позволяет применять его в качестве армирующей добавки для полимерных композиционных материалов. Ларнит ($Na_2Ca_3Al_3F_{14}$) – прозрачный минерал белого или розового цвета, относящийся к группе галогенидов. Кристаллы ларнита имеют форму кубических зеркальных граней. Как островной силикат кальция, ларнит является высокотемпературным моноклинным полиморфным

Таблица 1

Фазовый состав и кислотно-основные свойства СВ и СД

Table 1. **Phase composition and basic-acid properties of SW and SD**

Наполнитель	Содержание компонентов	*p*H водной вытяжки при температуре 20 °С
СВ	78 % β-волластонита 22 % ларнита	11,73
СД	95 % диопсида 3 % кристобалита 2 % тридирмита	8,52

аналогом каоциооливина, который стабилен при температурах от 520 до 670 °С. Ларнит не может давать такого же модифицирующего эффекта как наполнители с анизодиаметричной формой частиц, поэтому желательно минимизировать его содержание в составе СВ.

Обсуждение

При применении доломита в качестве второго компонента шихты получается диопсид с небольшим содержанием в качестве побочной фазы кристаллических оксидов кремния SiO_2 (табл. 1). Компоненты побочной фазы трудно вступают в реакцию с водой, но в сильнощелочной среде в гидротермальных условиях проявляют активное взаимодействие с оксидами щелочных и щелочноземельных металлов, образуя в итоге гидратные соединения силикатов натрия, калия, кальция. Таким образом, можно сделать вывод о том, что фазовый состав СД и СВ полностью различный.

Измерение *p*H водной вытяжки силикатных наполнителей показало, что СД имеет более низкие значения, близкие к нейтральным (*p*H = 8,52), так как его синтез проходит в присутствии борной кислоты.

Характеристики пористости структуры синтезированных силикатных наполнителей значительно отличаются. При этом представленные в табл. 2 данные демонстрируют, что средний размер пор у исследуемых наполнителей сопоставим.

Показатель удельной поверхности пор (по методу Брунауэра, Эммета, Теллера (БЭТ)) наполнителя синтетического волластонита в 29 раз превышает соответствующий показатель для синтетического диопсида. Общий объем пор у СВ также значительно выше (в 80 раз), чем у СД, что может быть объяснено более низкой температурой твердофазного синтеза СВ и присутствием в его составе кристаллических модификаций кремнезема.

В диапазоне температур 500 – 800 °С карбонаты кальция и магния разлагаются, образуя оксиды, вступающие впоследствии во взаимодействие с ЗРШ с образованием волластонита при более высокой температуре диопсида [8].

По своей структуре пористый и зернистый СВ, содержит относительно небольшое количество частиц игольчатой формы (рис. 1, *а*). У диопсида отсутствуют игольчатые частицы, включения имеют меньший размер и более равномерно распределены по объему образца (рис. 1, *б*).

При анализе полученных кривых распределения пор наполнителей по размерам было определено, что частицы СД по своему диаметру варьируются от 3 до 20 нм (рис. 2, *а*), при этом средний диаметр составляет 4 – 6 нм. Следует отметить, что поры, превышающие по своему диаметру 43 нм, составляют небольшую долю от общего числа пор. В отличие от СД, кривые распределения пор по размерам у синтетического волластонита значительно более широкие. Зафиксировано

Таблица 2

Пористость синтезированных наполнителей

Table 2. **Porosity of synthesized fillers**

Показатель пористости	Значение показателя для наполнителя	
	СВ	СД
Удельная поверхность пор (БЭТ), $м^2/г$	17,895	0,614
Общий объем пор по BJH, $см^3/г$	0,081	0,001
Средний диаметр пор по BJH, нм	5,12	4,11

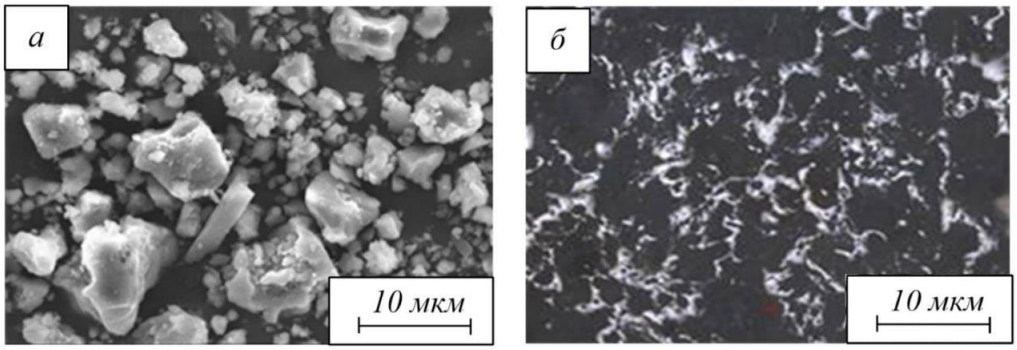


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображение синтетических наполнителей, содержащих волластонит (*а*) и диопсид (*б*)
Fig. 1. Electron micrograph of picture fillers containing wollastonite (*а*) and diopside (*б*)

достаточно большое количество пор до 100 нм (рис. 2). Более половины пор СВ имеют размер, превышающий 10 нм.

Диопсид имеет значительно меньшую удельную поверхность (в 27 раз) и средний размер частиц (в 9 раз), чем синтетический волластонит (табл. 3).

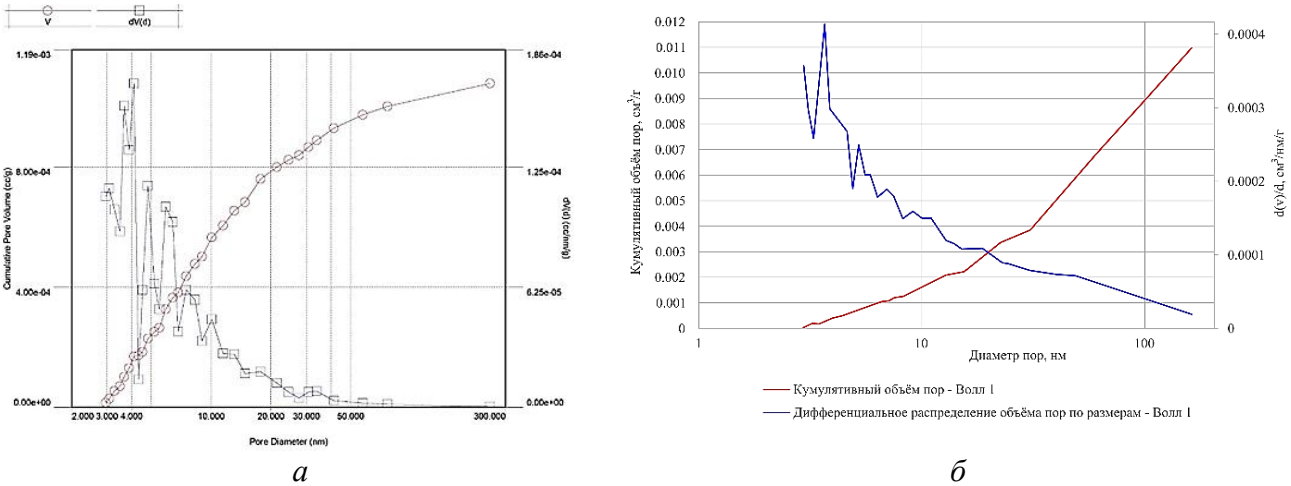
Кривые распределения частиц СВ по размерам имеют полимодальный характер, а СД – унимодальный [9; 10]. Кроме того, у СД на порядок меньший размер частиц и их удельная поверхность (табл. 3). Это тоже вносит свой вклад в характер их модифицирующего действия, влияя на площадь поверхности раздела фаз.

Волластонит и диопсид, полученные на основе золы рисовой шелухи, повышают твердость эпоксидных композиций примерно на 10 – 15 % из-за относительно высокой твердости этих минералов (4,5 – 5,0 и 5,5 – 6,0 по Моосу) [8; 11; 12]. При этом несколько больший эффект обеспечивает более твердый диопсид.

При наполнении СВ и СД растет износостойкость покрытий (табл. 4), что может быть объяснено локализацией частиц силикатов в объеме деформации сдвига [12], что предохраняет наполненный композит от возможного разрушения. Следовательно, синтезируемые КМС с высокой поверхностной энергией могут вступать в адсорбционное и адгезионное взаимодействие с эпоксидным полимером [13].

При оптимальной концентрации изученных наполнителей износостойкость эпоксидных композиций выше при использовании синтетического волластонита, оказывающего микроармирующее действие и имеющего триклинную сингонию.

Диопсид и волластонит, содержащиеся в наполнители, уменьшают коэффициент статического трения [14], то есть улучшают трибологические свойства эпоксидных материалов (табл. 4). Несколько больший эффект в этом случае оказывает СД, являющийся керамической фазой. Он значительно улучшает термические свойства (теплопроводность, которая может достигать 2,7 Вт/(м·К)) [15]. Кальций-магниевые силикаты способны отводить тепло от зоны трения и образовывать соединения с улучшенной износостойкостью и твердостью на трущихся поверхностях, что приводит к улучшению антифрикционных характеристик композиций [16; 17].



а *б*

Рис. 2. Распределение пор синтетического диопсида (*а*) и волластонита (*б*) по размерам по методу BJH
Fig. 2. Distribution of pore sizes of synthetic diopside (*а*) and wollastonite (*б*) under BJH method

Таблица 3

Средний размер и удельная поверхность частиц силикатов

Table 3. **Average size and specific surface of silicates' particles**

Показатель	Значение показателя для наполнителя	
	СД	СВ
Средний размер частиц, мкм	1,49	13,69
Удельная поверхность, $см^2/см^3$	1958	52852

Рассматриваемые силикатные наполнители увеличивают адгезию эпоксидных покрытий к стали (табл. 4). Наполнение силикатами приводит к образованию более организованной структуры полимерной матрицы [18 – 20].

Следовательно, синтетические волластонит и диопсид представляют собой эффективные наполнители композиционных эпоксидных материалов ввиду того, что они способны увеличивать износостойкость и твердость модифицированных полимерных материалов, обеспечивать улучшенные адгезионные свойства, следовательно, их можно использовать в качестве эффективных антифрикционных покрытий.

Выводы

Синтетический волластонит и диопсид, синтезированные из отхода сельскохозяйственного производства золы рисовой шелухи, по своему фазовому составу содержат достаточно высокое количество целевых продуктов (82 % волластонита и 95 %диопсида). Рассматриваемые вещества представляют собой эффективные наполнители эпоксидных композиционных материалов благодаря улучшению эксплуатационных характеристик (твердости, адгезионной прочности, износостойкости, антифрикционных показателей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шичалин О.О., Тарабанова А.Е., Папынов Е.К., Федорец А.Н., Буравлев И.Ю., Капустина О.В., Корнакова З.Э., Грибова В.В., Грибанова С.С. Гибридный микроволновой твердофазный синтез волластонита на основе природного возобновляемого сырья. *Журнал неорганической химии.* 2022;67(9):1266–1273. *http://dx.doi.org/10.31857/S0044457X22090124*
2. Горбачев Д.В., Верещагин В.И., Роот Л.О. Эффективная технология изготовления электротехнической керамики из маложелезистых диопсидовых пород. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2024;335(8):29–36. *http://dx.doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4681*
3. Ma C., Hu J., Zong Z., Wang Ch., Gao D., Li Ch., Li X. Preparation of porous silica microspheres using silica nanoparticles with different morphologies and their properties as catalyst carriers. *Journal of Porous Materials*. 2023;31:377–390.
4. Готлиб Е.М., Твердов И.Д., Галимов Э.Р., Долгова А.В., Гимранова А.Р. Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных композициях диопсидсодержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья. *Известия КГАСУ*. 2023;3(65):36–44.
5. Zuwanna I., Riza M., Aprilia S., Syamsuddin Y. Biocomposite based on whey protein isolate with the addition silica from rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*. 2022;63:147–152. *http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.056*
6. Готлиб Е.М., Галимов Э.Р., Валеева А.Р., Кормушин К.В. *Эпоксидные композиционные материалы с наполнителями на основе золы рисовой и гречневой шелухи и металлургических шлаков: Монография*. Казань: Изд-во АН РТ, 2023:168.
7. Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Sokolova A.G., Pirogova N.N. The Impact of Calcium Silicate Obtained from Zeolite Siliceous

Таблица 4

Эксплуатационные свойства эпоксидных материалов, наполненных КМС

Table 4. **Performance properties of epoxy materials filled with CMS**

Показатель	Значение показателя для наполнителя		
	Базовый состав (без наполнителя)	СВ	СД
Адгезия к стали, МПа	3,2	3,9	3,7
Коэффициент трения	0,39	0,17	0,14
Износ, 10^{-6} м	17,7	9,7	10,8
Примечание. Содержание наполнителя 10 масс. ч. на 100 масс. ч. ЭД-20			

Rock on Properties of Ceramic Materials. *Construction Economics.* 2024;10:433–435.

8. Твердов И.Д., Готлиб Е.М., Нцуму Р.Ш., Ямалеева Е.С. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров. *Южно-Сибирский научный вестник.* 2023;4:11–15. *http://dx.doi.org/10.25699/SSSB.2023.50.4.017*

9. Твердов И.Д., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Холин К.В., Султанов Т.В. Изучение фазовых превращений в процессе твердофазного синтеза диопсида на основе золы рисовой шелухи. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.* 2024;86(2):277–273. *http://dx.doi.org/ 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283*

10. Gotlib E.M., Tverdov I.D., Phuong H.T., Sokolova A.G. The impact of production temperature of synthetic wollastonite filled with rice husk on its composition and modifying effect. *IOP Conference Series Materials Science.* 2021;1030(1):012004. *http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012004*

11. Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С., Валеева А.Р., Твердов И.Д. Антифрикционные эпоксидные материалы, наполненные силикатами на основе ископаемого, растительного и техногенного сырья. *Ползуновский вестник.* 2024;1:214–223. *http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.027*

12. Соколова А.Г. Поливинилхлоридные композиционные материалы с наполнителем из рисовой шелухи и её золы: сопоставительный анализ с зарубежными аналогами. *Экономика строительства.* 2023;11:93–96.

13. Uflyand I.E., Irzhak V.I. Recent advances in the study of structure and properties of fiber composites with an epoxy matrix. *Journal of Polymer Research.* 2021;28:440. *http://dx.doi.org/10.1007/s10965-021-02783-9*

14. Samad U.A., Mohammed J.A., Alam A. Maximizing the functional properties of epoxy coatings using milled Al for enhanced mechanical strength and corrosion resistance. *Material Science -Poland.* 2024;42(4):34–49. *http://dx.doi.org/10.2478/msp-2024-0042*

15. Getem C., Gabbiye N. Synthesis and Characterization of β-Wollastonite from Limestone and Rice Husk as Reinforcement Filler for Clay Based Ceramic Tiles. In: *Advances of Science and Technology. 7th EAI International Conference, ICAST 2019, Bahir Dar, Ethiopia.* 2019:695–706. *http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2_53*

16. Lakov L., Jivov B., Aleksandrova M., Yordanov S., Toncheva K. Synthesis, phase composition and microstructure of colored ceramic materials based on diopside. *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations.* 2020;6(3):77–79.

17. Lokesh K.S., Pinto T., Mayya D.S., Shanmugan B.K., Panduranga B.P., Hanumanthappa H., Mohanraj G.T. Effect of Wollastonite Filler on the Experimental and Microstructural Analysis of Epoxy Composite Reinforced with E-glass Fibre. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D.* 2022; 103:489–496. *http://dx.doi.org/10.1007/s40033-022-00347-9*

18. Kholikulovuch O.E. Improved installation for determining antifriction properties of materials. In: *E3S Web of Conferences. CONMECHYDRO – 2023.* 2023; 401:04024. *http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202340104024*

19. Валеева А.Р., Гареев Б.И., Ситнов С.А., Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Износостойкие эпоксидные материалы, наполненные продуктами переработки рисовой и гречневой шелухи. *Экономика строительства.* 2022;8:46–54.

20. Садыкова Д.Ф., Валеева А.Р., Гимранова А.Р., Готлиб Е.М. Эпоксидные и поливинилхлоридные материалы для покрытия полов с синтетическим волластонитом на основе золы рисовой шелухи. *Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал.* 2024; 1(12):64–66.

REFERENCE

1. Shichalin O.O., Tarabanova A.E., Papynov E.K., Fedorets A.N., Buravlev I.Yu., Kapustina O.V., Kornakova Z.E., Gribova V.V., Gribanova S.S. Hybrid microwave solid-phase synthesis of wollastonite from natural renewable raw materials. *Zhurnal neorganicheskoi khimii.* 2022;67(9):1266–1273. (In Russ.). *http://dx.doi.org/10.31857/S0044457X22090124*

2. Gorbachev D.V., Vereshchagin V.I., Root L.O. Efficient technology for manufacturing electrical ceramics from low-iron diopside rocks. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* 2024;335(8):29–36. (In Russ.). *http://dx.doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4681*

3. Ma C., Hu J., Zong Z., Wang Ch., Gao D., Li Ch., Li X. Preparation of porous silica microspheres using silica nanoparticles with different morphologies and their properties as catalyst carriers. *Journal of Porous Materials.* 2023; 31:377–390.

4. Gotlib E.M., Tverdov I.D., Galimov E.R., Dolgova A.V., Gimranova A.R. Comparison of the modifying action in epoxy compositions of diopside-containing fillers based on technogenic

and plant raw materials. *Izvestiya KGASU.* 2023; 3(65):36–44. (In Russ.).

5. Zuwanna I., Riza M., Aprilia S., Syamsuddin Y. Biocomposite based on whey protein isolate with the addition silica from rice husk ash. *Materials Today: Proceedings.* 2022;63:147–152. *http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.056*

6. Gotlib E.M., Galimov E.R., Valeeva A.R., Kormushin K.V. *Epoxy composite materials with fillers based on rice and buckwheat husk ash and metallurgical slag: Monograph*. Kazan': Izd-vo AN RT, 2023:168. (In Russ.).

7. Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Sokolova A.G., Pirogova N.N. The Impact of Calcium Silicate Obtained from Zeolite-Siliceous Rock on Properties of Ceramic Materials. *Construction Economics.* 2024;10:433–435.

8. Tverdov I.D., Gotlib E.M., Ntsumu R.Sh., Yamaleeva E.S. Diopside as a filler for epoxy polymers. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik.* 2023;4:11–15. (In Russ.). *http://dx.doi.org/10.25699/SSSB.2023.50.4.017*

9. Tverdov I.D., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Kholin K.V., Sultanov T.V. Study of phase transformations in the process of solid-phase synthesis of diopside based on rice husk ash. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. 2024;86(2):277–273. (In Russ.). *http://dx.doi.org/ 10.20914/2310-1202-2024-2-277-283*

10. Gotlib E.M., Tverdov I.D., Phuong H.T., Sokolova A.G. The impact of production temperature of synthetic wollastonite filled with rice husk on its composition and modifying effect. *IOP Conference Series Materials Science.* 2021;1030(1):012004. *http://dx.doi.org/ 10.1088/1757-899X/1030/1/012004*

11. Gotlib E.M., Yamaleeva E.S., Valeeva A.R., Tverdov I.D. Antifriction epoxy materials filled with silicates based on fossil, plant and man-made raw materials. *Polzunovskii vestnik.* 2024;1:214–223. (In Russ.). *http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.027*

12. Sokolova A.G. Polyvinyl chloride composite materials with filler from rice husk and its ash: comparative analysis with foreign analogues. *Ekonomika stroitel'stva.* 2023; 11:93–96. (In Russ.).

flyand I.E., Irzhak V.I. Recent advances in the study of structure and properties of fiber composites with an epoxy matrix. *Journal of Polymer Research.* 2021;28:440. *http://dx.doi.org/10.1007/s10965-021-02783-9*

14. Samad U.A., Mohammed J.A., Alam A. Maximizing the functional properties of epoxy coatings using milled Al for enhanced mechanical strength and corrosion resistance. *Material Science-Poland.* 2024;42(4):34–49. *http://dx.doi.org/10.2478/msp-2024-0042*

15. Getem C., Gabbiye N. Synthesis and Characterization of β–Wollastonite from Limestone and Rice Husk as Reinforcement Filler for Clay Based Ceramic Tiles. In: *Advances of Science and Technology. 7th EAI International Conference, ICAST 2019, Bahir Dar, Ethiopia.* 2019:695–706. *http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2_53*

akov L., Jivov B., Aleksandrova M., Yordanov S., Toncheva K. Synthesis, phase composition and microstructure of colored ceramic materials based on diopside. *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations.* 2020;6(3):77–79.

17. Lokesh K.S., Pinto T., Mayya D.S., Shanmugan B.K., Panduranga B.P., Hanumanthappa H., Mohanraj G.T. Effect of Wollastonite Filler on the Experimental and Microstructural Analysis of Epoxy Composite Reinforced with E-glass Fibre. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D.* 2022; 103:489–496. *http://dx.doi.org/10.1007/s40033-022-00347-9*

18. Kholikulovuch O.E. Improved installation for determining antifriction properties of materials. In: *E3S Web of Conferences. CONMECHYDRO – 2023.* 2023;401:04024. *http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202340104024*

19. Valeeva A.R., Gareev B.I., Sitnov S.A., Sokolova A.G., Gotlib E.M. Wear-resistant epoxy materials filled with processed rice and buckwheat husk products. *Ekonomika stroitel'stva.* 2022;8:46–54. (In Russ.).

20. Sadykova D.F., Valeeva A.R., Gimranova A.R., Gotlib E.M. Epoxy and PVC floor coverings with synthetic wollastonite based on rice husk ash. *Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал.* 2024;1(12):64–66.

Сведения об авторах

***Алла Германовна Соколова**, к.т.н., доцент, доцент кафедры строительного материаловедения,* Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
***E-mail**:* as.falconi@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0001-8425-1883
***SPIN-код**:* 1931-5614

***Елена Михайловна Готлиб**, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии синтетического каучука,* Казанский национальный исследовательский технологический университет
***E-mail**:* egotlib@yandex.ru

***ORCID**:* 0000-0003-2318-7333
***SPIN-код**:* 4241-6212

Information about the authors:

***Alla G. Sokolova**, PhD. Sci. (Tech.), Associate Prof., Associate Professor of the Department of Materials Science*, National Research Moscow State University of Civil Engineering
***E-mail**:* as.falconi@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0001-8425-1883
***SPIN-код**:* 1931-5614

***Elena M. Gotlib**, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Professor of the Department of Synthetic Rubber Technology,* Kazan National Research Technological University
***E-mail**:* egotlib@yandex.ru

***ORCID**:* 0000-0003-2318-7333
***SPIN-код**:* 4241-6212

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 03.04.2025
После доработки 30.05.2025
Принята к публикации 09.06.2025

Received 03.04.2025
Revised 30.05.2025
Accepted 09.06.2025