

Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой

Светлана Васильевна Самченко , Андрей Владимирович Коршунов* 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: korshunovav@mgsu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Расширение перечня вяжущих, заполнителей и наполнителей, функциональных добавок и модификаторов структуры бетонов и композитов позволяет в настоящее время получать инновационные материалы с улучшенными механическими, физическими и физико-химическими характеристиками. Представляют интерес легкие конструкционные и функциональные материалы на основе вяжущих различной природы с заполнителями из растительного сырья (опилкобетон, арболит, фибролит, ксилолит и др.). Целью работы являлось получение и исследование свойств бесцементного древесно-минерального композиционного материала с пористой структурой, стабилизированной с использованием высокодисперсной алюмосиликатной добавки. **Материалы и методы.** В работе использовали бесцементное шлакосиликатное вяжущее, включающее молотый доменный шлак и активатор твердения – раствор силиката натрия (натриевое жидкое стекло). Для формирования пористой структуры материала применяли синтетический пенообразователь с высокодисперсной добавкой (бентонит). В качестве заполнителя использовали дробленку хвойных пород. Была получена серия образцов, в которых варьировали компоненты в следующих интервалах: шлак 330–440 кг/м³, древесная дробленка 120–160 кг/м³, отношение затворитель/шлак 0,5–0,7. Часть образцов подвергали термической обработке путем нагрева в термостате при температурах 80–90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч. Образцы изучали с использованием методов механических испытаний, термогравиметрии, РФА, определяли пористость, теплопроводность. **Результаты.** В работе получен бесцементный пористый древесно-минеральный композиционный материал (аналог арболита). Показано, что введение в смесь молотого доменного шлака (330–440 кг/м³) и древесины (125–160 кг/м³) при оптимальных соотношениях жидкое стекло/шлак 0,7 и пенообразующая смесь/шлак 0,0035 (3,5% пенообразователя + 4% бентонита) позволяет получить композиционный материал плотностью 550–680 кг/м³, прочностью при сжатии 1,35–3,65 МПа, открытой пористостью 45–50%, средней теплопроводностью 0,08 Вт/(м·К). Тепловлажностная обработка композита при 80–90 °С способствует достижению марочной прочности в течение 10–12 ч. Присутствие в пенообразующей смеси ультрадисперсной гелеобразующей добавки (бентонит) с размерами частиц 1–5 мкм способствует стабилизации однородной пористой структуры композиционного материала (размеры сфероидных пор менее 1 мм). **Заключение.** Полученный в работе пористый древесно-минеральный композиционный материал может быть использован для производства легких ненесущих конструктивных элементов, в качестве шумо- и теплоизоляционного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: древесно-минеральный пористый композит, шлакосиликатное вяжущее, высокодисперсный стабилизатор структуры, тепловлажностная обработка, прочность, водопоглощение, теплопроводность

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Самченко С.В., Коршунов А.В. Структура и свойства пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего с высокодисперсной алюмосиликатной добавкой. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):137–148. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-137-148>. – EDN: XOSGDC.

Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive

Svetlana V. Samchenko , Andrey V. Korshunov* 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: korshunovav@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. The extension of the range of binders, aggregates, and fillers as well as functional additives and structural modifiers for concrete and composite materials currently allows for the production of innovative materials with enhanced mechanical, physical, and physico-chemical properties. Lightweight structural and functional materials derived from binders of different natures with fillers derived from vegetable raw materials, such as sawdust concrete, arbolite, fibrolite, or xylolite, are of particular interest. The aim of this research was to develop and investigate the properties of a wood-mineral cement-free composite material with a porous structure that has been stabilized using a finely dispersed aluminosilicate additive. **Materials and methods of research.** A cement-free slag-based silicate binder was utilized in the study, comprising ground blast furnace slag and a curing agent – a solution of sodium silicate (sodium liquid glass). A synthetic foam-forming agent with a finely dispersed additive (bentonite) was employed to create the porous structure of the material. Crushed softwood was used as an aggregate. A range of samples were produced, varying the composition within the following parameters: slag 330–440 kg/m³, crushed wood 120–160 kg/m³, and solution-to-slag ratio 0.5–0.7. Several samples were subjected to thermal treatment by heating in a temperature-controlled environment at 80–90 °C and at humidity of at least 90% for 6–12 hours. Samples were examined using mechanical testing methods, thermogravimetric analysis, X-ray diffractometry, porometry, and thermal conductivity measurements. **Results and Discussion.** A cement-free porous wood-mineral composite material (an analogue of arbolite) was obtained. It is shown that the introduction of ground blast furnace slag (330–440 kg/m³) and crushed softwood (125–160 kg/m³) into the mixture at optimal ratios of liquid glass/slag 0.7 and foaming mixture/slag 0.0035 (3.5% foaming agent + 4% bentonite) makes it possible to obtain a composite material with a density of 550–680 kg/m³, compressive strength of 1.35–3.65 MPa, an open porosity of 45–50%, and an average thermal conductivity of 0.08 W/(m·K). The heat and humidity treatment of the composite at 80–90 °C contributes to the achievement of ultimate strength within 10–12 h. The presence of a finely gel-forming additive (bentonite) with particle sizes of 1–5 μm in the foaming mixture helps to stabilize the homogeneous porous structure of the composite material (spherical pore sizes less than 1 mm).

Conclusion. The porous wood-mineral composite material obtained in the work can be used for the production of lightweight non-load-bearing structural elements, as a noise and thermal insulation material.

KEYWORDS: wood-mineral porous composite, slag-silicate binder, finely dispersed structure stabilizer, heat and moisture treatment, strength, water absorption, thermal conductivity

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education (RF), Project FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Samchenko S.V., Korshunov A.V. Structure and properties of a porous wood-mineral composite based on slag-silicate binder with a finely dispersed aluminosilicate additive. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):137–148. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-137-148>. – EDN: XOSGDC.

ВВЕДЕНИЕ

Бетоны являются универсальными строительными материалами с широким спектром возможностей варьирования состава, структуры и областей практического использования. Расширение перечня вяжущих, заполнителей и наполнителей, функциональных добавок и модификаторов структуры позволяет в настоящее время получать инновационные материалы с улучшенными механическими, физическими и физико-химическими характеристика-

ми [1, 2]. Актуальным направлением в индустрии строительных материалов является снижение энерго- и ресурсоемкости на всех этапах производства за счет комплексной переработки сырья, использования техногенных отходов, широкого внедрения аддитивных технологий, экологизации технологий получения и утилизации материалов [1]. В этом отношении представляет интерес особый класс легких бетонов на основе вяжущих различной природы с заполнителями из растительного сырья (опилкобетон, арболит, фибролит, ксилолит и др.) [2]. Древесно-

минеральные композиты совмещают в себе свойства материалов на основе минеральных вяжущих (прочность, термическая стойкость, огнестойкость) и растительного сырья (низкий удельный вес, пористость, низкая теплопроводность, коррозионная стойкость) [2, 3]. Несмотря на продолжительный опыт получения и применения таких материалов, до сих пор проводится большое число исследований, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик путем варьирования состава вяжущего (цементные и бescементные вяжущие), содержания, состава и структуры органического заполнителя (древесная дробленка, стружка, опилки, щепа, костра, лузга), введения добавок (минерализаторы, порообразователи, гидрофобизаторы [4–15]). В связи с этим изучение закономерностей формирования структуры древесно-минеральных композитов и их свойств представляет несомненный научный и прикладной интерес.

Исследования по получению древесно-минеральных композиционных материалов на основе щелочно-активированных шлако содержащих вяжущих немногочисленны, хотя такие материалы имеют большие перспективы внедрения с позиции ресурсосбережения и экологизации при их производстве [2, 4]. Вяжущей основой в таких материалах выступают алюмосиликатные соединения природного (глины) и техногенного (зола-унос, металлургические шлаки) происхождения, активаторами процесса схватывания и отвердевания являются щелочные реагенты (едкие щелочи, жидкое стекло, щелочные плавы) [4]. Сильнощелочная среда таких вяжущих способствует лучшей адгезии древесного заполнителя к минеральной матрице за счет проникновения раствора через клеточные стенки древесины, минерализации и упрочнения на границе контакта вяжущее/древесина [16, 17].

В большей части работ по изучению свойств композитов на основе щелочно-активированных вяжущих в качестве заполнителя использованы мелкодисперсные древесные отходы [16–18]. Например, высокая доля древесных волокон размерами ~2,36 мм (10–50 мас.%) в смеси с вяжущим на основе золы уноса и смешанного активатора $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ (2,5:1) приводит к снижению плотности (1720–1300 кг/м³), увеличению пористости и водопоглощения (0,5–3,5%), снижению прочности при сжатии (33–5 МПа) получаемого в условиях термической обработки (60 °С, 24 ч) композиционного материала [18]. Прессование щелочно-активированных смесей, содержащих золу уноса, метакаолин (20 мас.%) и лигноцеллюлозных отходов (20 мас.%) в присутствии активатора $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ с последующей термообработкой (60–100 °С) позволяет получать легкие композитные плиты (1,1 кг/м³), характери-

стики которых позволяют рассматривать такие материалы как замену древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит на органической связке [19]. В работе [20] показано, что введение опилок хвойных пород до 6,3 мас.% в шлакощелочную смесь (молотый шлак, активатор NaOH 4,9–7,1 мас.%) приводит к двукратному возрастанию прочности при изгибе и снижению прочности при сжатии по сравнению с контрольным образцом. Причиной повышения прочности является формирование оптимальной армированной микроструктуры материала, выражающееся в понижении трещинообразования. Увеличение доли опилок в составе композита до 10 мас.% приводит к понижению прочности и плотности (от 1836 до 1027 кг/м³) образцов, повышению их открытой пористости более чем в 2 раза. Особенности формирования структуры композита является образование С–S–Н и С–А–S–Н гидратных фаз с волокнистой, игольчатой и пластинчатой морфологией. Одним из факторов, повышающих устойчивость композита к трещинообразованию, является повышение адгезии опилок к цементной матрице за счет заполнения вяжущим микропор в опилках. Характерной особенностью материала является существенное понижение теплопроводности (от 0,553 до 0,203 Вт/м·К) при увеличении содержания опилок до 10 мас.%.

В работе [21] показано, что введение 10 мас.% древесного заполнителя (опилки, волокно, мука) в шлакощелочное вяжущее (70% золы уноса + 30% метакаолина, щелочной активатор $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) способствует снижению прочности композита при сжатии в 2–3 раза по сравнению с контрольным образцом. При этом повышение дисперсности заполнителя положительно сказывается на прочности композиционного материала. Добавление достаточно большой доли сосновых опилок к прокаленной глине (массовое отношение 3:1) с использованием натриевого жидкого стекла в качестве активатора в условиях термической обработки (75 °С, 24–38 ч) позволяет получить легкий композиционный материал (плотность 610–760 кг/м³) с высокими значениями прочности при изгибе и сжатии и модуля упругости [22]. Такой материал характеризуется более чем в 3 раза низкой теплопроводностью по сравнению с контрольным материалом. Показана возможность производства фасонных изделий для кладки из смесей, содержащих золу-унос, молотый металлургический шлак, щелочной активатор $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ и древесную щепу (до 68 об.%) [23].

Анализ литературных данных показал, что систематические исследования свойств бescементных пористых древесно-минеральных композиционных материалов практически отсутствуют. В связи с этим целью работы являлось получение и исследование

свойств композитов на основе шлакосиликатного вяжущего с пористой структурой, стабилизированной с использованием высокодисперсной алюмосиликатной добавки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения композиционного материала использовали шлакосиликатное вяжущее, в состав которого входил молотый доменный шлак и активатор твердения (раствор силиката натрия, натриевое жидкое стекло). Молотый гранулированный доменный шлак (ООО «Мечел-материалы», Челябинск, РФ) имел площадь удельной поверхности $550 \text{ м}^2/\text{кг}$ и насыпную плотность $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$. Состав шлака определяли в соответствии с ГОСТ 3476-2019, результаты определения химического состава приведены в таблице 1. Исходя из химического состава коэффициент качества шлака равен 1,57.

Раствор силиката натрия (натриевое жидкое стекло $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, $\rho = 1,5 \text{ г}/\text{см}^3$) марки СНЖ1 (ООО «ПромКерамика», Щекино, РФ) по ГОСТ 13078-2021, использованный для отверждения композиционного материала, содержал 29 мас.% SiO_2 и 10,4 мас.% Na_2O , силикатный модуль $n = 2,8$.

Для формирования пористой структуры материала применяли синтетический анионоактивный («ПБ-Люкс») и белковый («Эталон») пенообразователи, характеристики которых приведены в таблице 2.

Пену готовили с использованием портативного пневматического пеногенератора ИК FOAM Pro 2+ из растворов с различным соотношением воды и пенообразователя. Для полученной пены определяли кратность по соотношению объемов пены и исходного раствора и показатель устойчивости по отделению жидкости при выдерживании пены в течение 30 мин. Предварительные испытания показали, что оптимальное содержание пенообразователя для получения пены с достаточной кратностью составляет 3,5%. Для повышения устойчивости пены в составе шлакощелочной смеси использовали высокодис-

персную гелеобразующую алюмосиликатную добавку (глинопорошок бентонитовый П1Т1 по ГОСТ 28177-89, ООО «Бентохолдинг», Москва, РФ) с размером частиц 1–5 мкм и с содержанием основного глинистого минерала монтмориллонита не менее 70 мас.%.

В качестве заполнителя при получении древесно-минерального композиционного материала использовали дробленку хвойных пород по ГОСТ 19222-2019 (ТПК «Смоленский лес», Дорогобуж, РФ) с игольчатыми или плоскими частицами размерами 2–20 мм, насыпной плотностью 120–140 кг/м³ и влажностью 10–15%.

Для определения характеристик изучаемого в работе материала изготавливали образцы в виде призм размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}^3$ и кубов с размером стороны 100 мм. Бетонную смесь готовили с использованием лабораторного смесителя CONTROLS 65-L0006/AM путем последовательной загрузки в чашу при перемешивании древесной дробленки, молотого шлака, высокодисперсной добавки, раствора силиката натрия и пены из пеногенератора. Для определения оптимального соотношения компонентов вяжущего и наполнителя, при которых может быть получен композитный материал, удовлетворяющий требованиям к самонесущим блокам конструкционно-теплоизоляционного назначения (марка плотности в сухом состоянии D600, класс прочности на сжатие B1.5), была получена серия образцов, в которых варьировали компоненты в следующих интервалах: шлак 330–440 кг/м³, древесная дробленка 120–160 кг/м³, отношение затворитель/шлак 0,5–0,7. Общая продолжительность перемешивания бетонной смеси с момента загрузки всех компонентов составляла 5 мин. Формование образцов проводили путем послойной укладки и конечного уплотнения смесей в формах на виброплощадке. Заготовки выдерживали в формах при температуре $20 \pm 2 \text{ °C}$ и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 1 сут, затем извлекали из форм и хранили в обычных лабораторных условиях. Часть образцов подвергали термической обработке путем нагрева в термостате

Таблица 1. Химический состав шлака

Содержание оксидов (мас. %)								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2
34,1	11,7	0,6	36,5	10,8	0,7	0,8	2,6	2,2

Таблица 2. Характеристики использованных в работе пенообразователей

Пенообразователь	Плотность, г/см ³	pH
ПБ-Люкс (АО «РХЗ Нордикс», Воскресенск, РФ)	1050–1100	8–10
Эталон (ООО «Аист», Челябинск, РФ)	1120	6,5–8

при температурах 80–90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч.

Определение прочностных характеристик полученных образцов (прочности при сжатии и изгибе) проводили после 28 сут хранения с использованием универсальной испытательной машины UPB 86/200 Form+Test (Германия). Испытания образцов одного и того же состава были повторены шесть раз, на основании полученных результатов были рассчитаны средние значения прочности. Определение водопоглощения (по массе и объему) пористого композита проводили в соответствии с ГОСТ 12730.3-2020 путем взвешивания образцов в водонасыщенном состоянии. Термический анализ (ДТА+ТГ) материалов проводили с использованием термоанализатора SDT Q600 (США), образцы нагревали до 1000 °С при скорости возрастания температуры 10 °/мин, скорость продувки воздуха через печь анализатора составляла 100 мл/мин. Тепловыделение в ходе гидратации вяжущего изучали с использованием изотермической калориметрии (ТАМ Air 3116-2, TA Instruments, США). Фазовый состав материалов определяли по данным рентгенофазового анализа, рентгенодифрактограммы регистрировали с использованием дифрактометра SHIMADZU XRD 6000 (Япония) с медным анодом ($\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1,54056 \text{ \AA}$; напряжение на трубке 40 кВ, ток 40 мА) в диапазоне углов $2\theta = 5\text{--}70^\circ$ с шагом сканирования $0,02^\circ$. Определение площади удельной поверхности материалов проводилось по методу Брунауэра-Эмметта-Теллера с использованием прибора Quantachrome NOVA 2200e (США) по низкотемпературной адсорбции-десорбции азота при 77 К. Измерения теплопроводности

образцов проводили с использованием измерителя типа ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076-99. Для изучения морфологии и структуры образцов использовали многофункциональный сканирующий электронный микроскоп JEOL JCM-6000 Plus (Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для формирования пористой структуры древесно-минерального композита принципиальным условием является получение пены с контролируемой кратностью, устойчивость которой позволит до начала схватывания вяжущего сохранить высокую дисперсность и однородность распределения пузырьков воздуха в объеме смеси исходных компонентов. Предварительные эксперименты с различными пенообразователями (табл. 2) показали, что белковый пенообразователь в щелочной среде силиката натрия образует менее устойчивую пену с малой кратностью по сравнению с синтетическим пенообразователем. Дальнейшее установление оптимальных соотношений компонентов для получения пены проводили с синтетическим пенообразователем. На рисунке 1 приведены результаты определения кратности получаемой пены и количества отделившейся жидкости в зависимости от состава исходной пенообразующей смеси.

Из полученных данных следует (рис. 1), что присутствие силиката натрия и бентонита в пенообразующей смеси различным образом влияет на характеристики получаемой пены. Если кратность пены практически не зависит от присутствия обеих добавок при их содержании $w \leq 4\%$ (рис. 1а), то водоотделение при расслоении пены в присутствии бен-

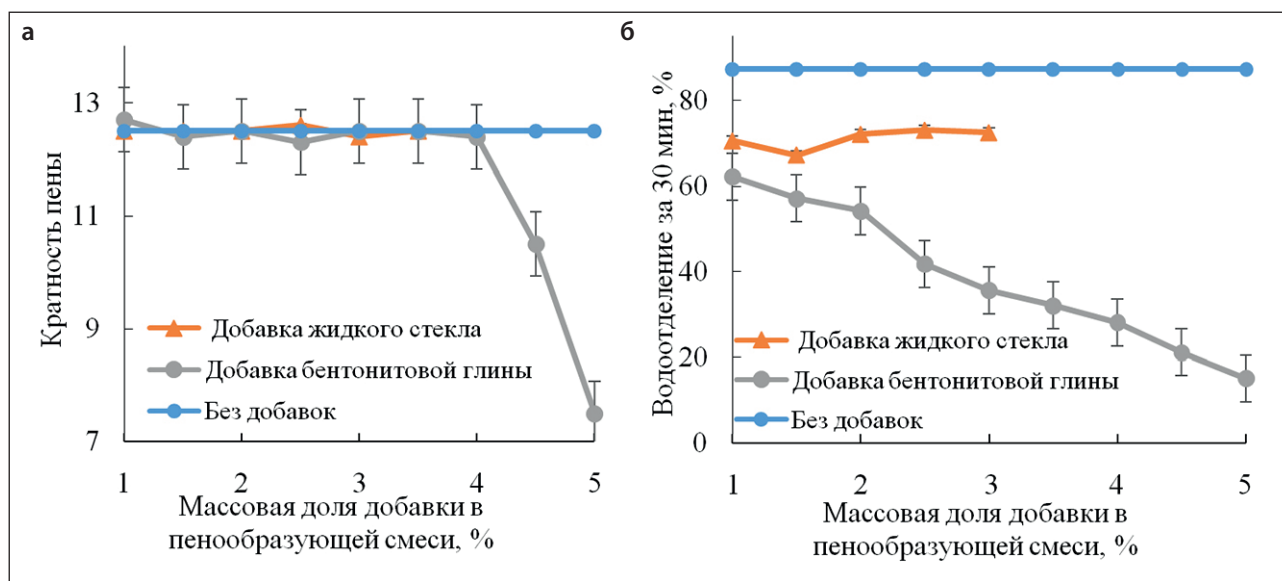


Рис. 1. Влияние присутствия жидкого стекла и бентонита в пенообразующем растворе (пенообразователь «ПБ-Люкс») на (а) кратность и (б) устойчивость пены

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

тонита в течение длительного времени существенно понижается (рис. 1б). Стабилизирующее действие микрочастиц бентонита связано с их сорбционным накоплением на границе раздела воздух/раствор, что затрудняет коалесценцию единичных пузырьков и увеличивает продолжительность устойчивого состояния пены. Более высокое содержание бентонита (более 4%) лучше стабилизирует пену, но уменьшает ее кратность (рис. 1а). Следовательно, введение бентонита в количестве 4% в жидкую фазу достаточно для получения пены с наибольшей кратностью и устойчивой в течение времени формирования пористой структуры композита.

Важными факторами, определяющими технологические характеристики бетонной смеси, являются удобоукладываемость, плотность, расслаиваемость, а также время начала и конца схватывания вяжущего. Для используемого в работе шлакосиликатного вяжущего были определены параметры, позволяющие достичь необходимого класса прочности камня для получения композиционного материала (табл. 3).

Достаточно короткие сроки схватывания в совокупности с высокой прочностью характерны для бесцементных шлакощелочных вяжущих [2], что объясняется интенсивно протекающим взаимодействием щелочного активатора с аморфными (стеклофаза) компонентами шлака с образованием плотной полимеризованной алюмосиликатной матрицы (так

называемым «геополимербетоном»). Для определения влияния введения пены на особенности взаимодействия между компонентами вяжущего была изучена кинетика тепловыделения в шлакощелочной смеси заданного состава (табл. 3) в присутствии пенообразователя и бентонита с использованием изотермической калориметрии. По данным измерений температуры контрольной смеси (без пенообразователя) и смеси, содержащей 0,35% пенообразующего раствора из расчета на массу шлака, определены зависимости теплового потока от времени реакции (до 240 ч), приведенные на рисунке 2.

Из результатов калориметрии следует (рис. 2), для контрольного образца смеси и образца с пенообразователем наблюдается несколько периодов тепловыделения. Начальный период с максимумом при времени ~10 мин характерен для обоих образцов, величина теплового потока практически не зависит от их состава. Второй период с максимумом тепловыделения по истечении ~2 ч характеризуется меньшим тепловым эффектом для образца с пенообразователем, что можно объяснить сорбцией ПАВ на поверхности частиц шлака и связанным с этим некоторым замедлением процесса формирования новообразований в затвердевшем материале (рис. 2а). При увеличении продолжительности взаимодействия в системе «шлак–затворитель» наблюдается смещение максимума тепловыделения в случае пористого

Таблица 3. Состав и характеристики шлакосиликатного вяжущего

Отношение жидкое стекло /шлак	Сроки схватывания, мин		Нормальная густота, %	Марка по прочности
	Начало	Конец		
0,7	30	50	46	M300

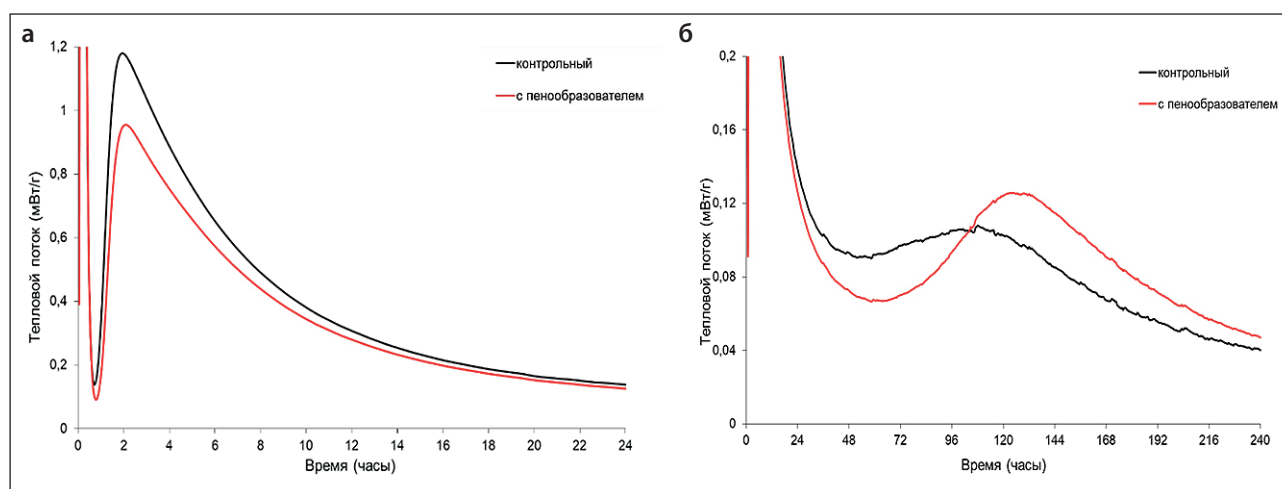


Рис. 2. Зависимости теплового потока от времени выдержки шлакосиликатной смеси в присутствии и в отсутствие пенообразователя на (а) начальном и (б) конечном этапе формирования структуры шлакосиликатного камня

образца (на ~18 ч) и его сужение по шкале времени по сравнению с контрольным образцом (рис. 2б). Этот эффект также объясняется торможением процессов структурообразования в твердом материале, которые по своей природе являются диффузионными. Тем не менее, сумма тепловых потоков во всем изученном интервале формирования структуры для обоих образцов практически совпадает и составляет порядка 105 Дж/г. Следовательно, вспенивание шлакосиликатной смеси не приводит к существенному изменению интенсивности гидратационных процессов, в особенности на ранних сроках твердения.

Известно, что шлакощелочные вяжущие быстро схватываются и набирают марочную прочность при термообработке [2, 20]. Для определения влияния температуры на фазовый состав продуктов, образующихся в ходе отвердевания вяжущего, были проведены две серии экспериментов при нагревании образцов при 80 и 90 °С и относительной влажности воздуха не менее 90% в течение 6–12 ч. Полученные данные РФА сравнивали с таковыми для образцов, твердевших при нормальных условиях в течение 1 и 28 сут. Типичная рентгенодифрактограмма шлакосиликатного камня приведена на рисунке 3.

Из данных РФА следует (рис. 3), что основными кристаллическими фазами, образующимися в ходе твердения как при нормальных условиях, так и при нагревании, являются окерманит (силикат каль-

ция-магния) и кальцит, общее содержание которых не превышает 10 мас.%. Преобладающим компонентом (до 90%) в шлакосиликатном камне является аморфная фаза. Кальцит образуется вследствие карбонизации щелочесодержащего материала, силикат кальция-магния образуется за счет взаимодействия жидкого стекла с компонентами шлака. Очевидно, что температурные условия твердения материала недостаточны для кристаллизации склонных к стеклообразованию силикатов, образующихся в системе. Таким образом, термообработка шлакосиликатного камня не приводит к существенному изменению состава кристаллических новообразований и увеличению их доли в материале.

По причине преимущественно рентгеноаморфной структуры продуктов взаимодействия в системе «шлак-жидкое стекло», состав продуктов, образующихся при введении в систему древесины, оценивали при помощи термического анализа. Образец для анализа имел следующий исходный состав: шлак 385 кг/м³, древесная дробленка 138 кг/м³, раствор жидкого стекла 270 кг/м³, пенообразователь 1,35 кг/м³, бентонит 1,54 кг/м³. Средние значения потери массы при нагревании до 1000 °С для образцов, полученных при нормальных условиях твердения, составляют 15%, после термической обработки – 10%. Типичные ТГ-ДТГ кривые линейного нагревания образцов приведены на рисунке 4.

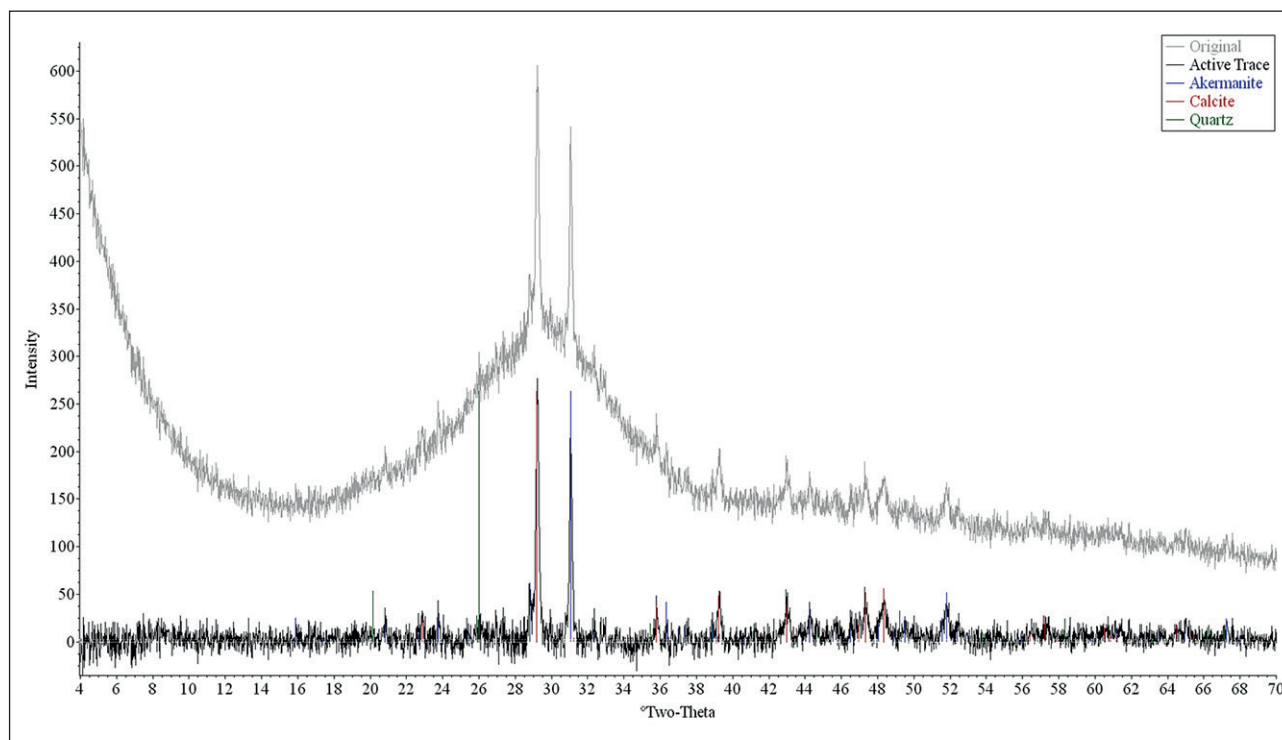


Рис. 3. Рентгенодифрактограмма образца шлакосиликатного камня (отношение жидкое стекло/шлак 0,7), подвергнутого термообработке при 90 °С в течение 10 ч

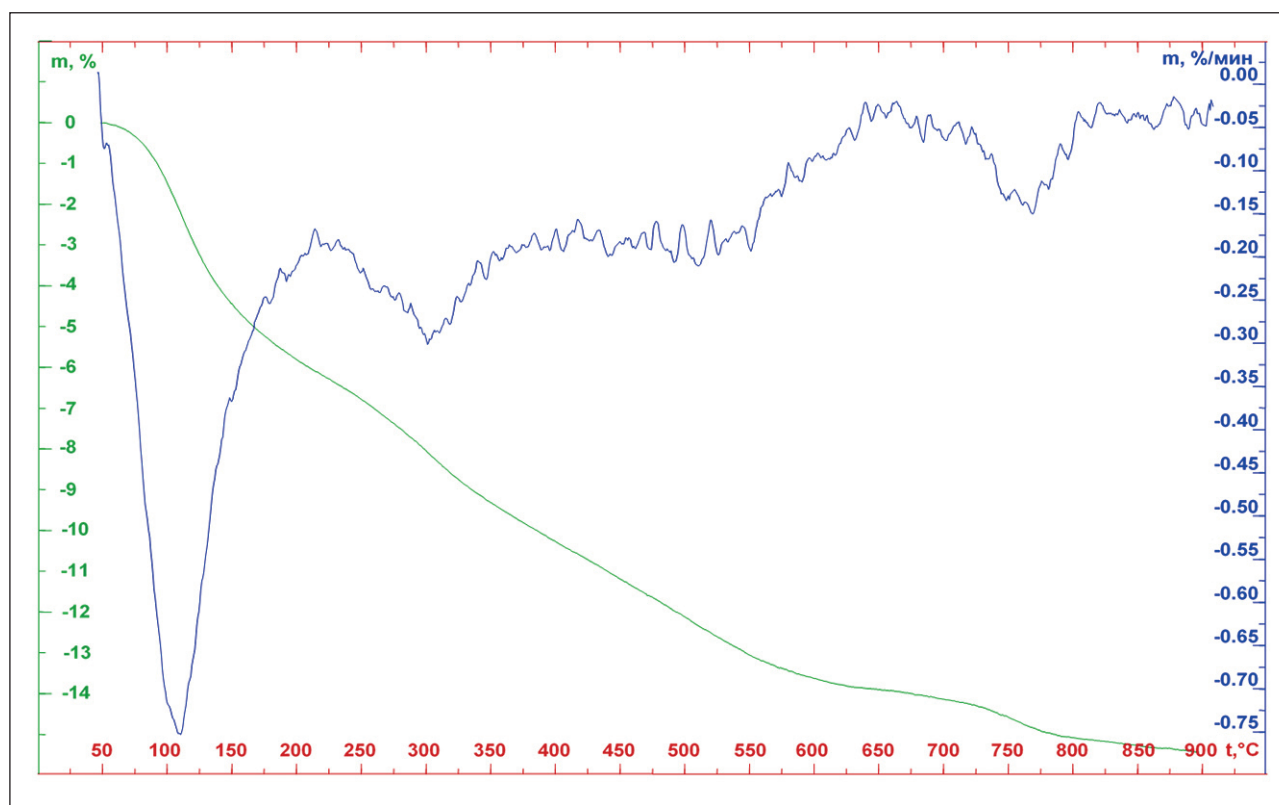


Рис. 4. ТГ (зеленая) и ДТГ (синяя) кривые, полученные при линейном нагревании образца пористого древесно-минерального композита после 28-ми суток его твердения в обычных лабораторных условиях

Для ТГ кривых материала характерны четыре основных ступени убыли массы и соответствующих им эндотермических эффектов в температурных интервалах 75–150, 225–375, 450–650 и 720–830 °С. В температурном диапазоне 75–150 °С происходит удаление слабосвязанной воды (капиллярной, сорбционной, межслоевой) в гидросиликатах натрия $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. При повышении температуры до 225–375 °С уменьшение массы образцов происходит вследствие дегидратации гидросиликатов кальция типа тоберморита. Слабовыраженный широкий эндотермический эффект в широком интервале температур 450–650 °С отображает термическое разложение (обугливание) древесины в материале. Параллельно этому при данных температурах происходит полная дегидратация тоберморита и гиролита, а также разложение остаточного портландита. Эффекты, обусловленные присутствием этих фаз, в большей мере проявляются на термограммах образцов на больших сроках твердения. Повышение температуры до 720–830 °С сопровождается разложением кальцита CaCO_3 , присутствие которого в образцах подтверждается данными РФА (рис. 3), а также гидроалюмосиликатов кальция и натрия. Образование кальцита в ходе формирования структуры образцов происходит в результате карбонизации

известии и гидросиликатов кальция. Таким образом, данные термического анализа показывают высокую долю новообразований в продуктах взаимодействия компонентов вяжущего, так как наибольшая потеря массы происходит при $T > 150$ °С за счет разложения сложных по составу гидратных фаз. Повышение температур разложения древесного наполнителя обусловлено минерализующим действием щелочно-силикатных компонентов вяжущего.

Особенности пористой структуры и структуры контактной зоны между частицами заполнителя и минеральной матрицей изучали при помощи электронной микроскопии (рис. 5).

Из данных микроскопии следует, что в материале преобладают поры закрытого типа, которые имеют преимущественно сферическую форму и размеры порядка 1 мкм и менее (рис. 5а). Межпоровые перегородки являются сплошными и имеют толщину порядка десятков микрон (рис. 5б). Продукты взаимодействия компонентов вяжущего различаются по морфологии, объемные частицы пластинчатой и призматической формы представляют собой гидросиликаты кальция с осажденными на их поверхности коллоидными частицами бентонита (рис. 5в). Особенностью контактной зоны на границе частиц древесины и минеральной матрицы является ее плот-

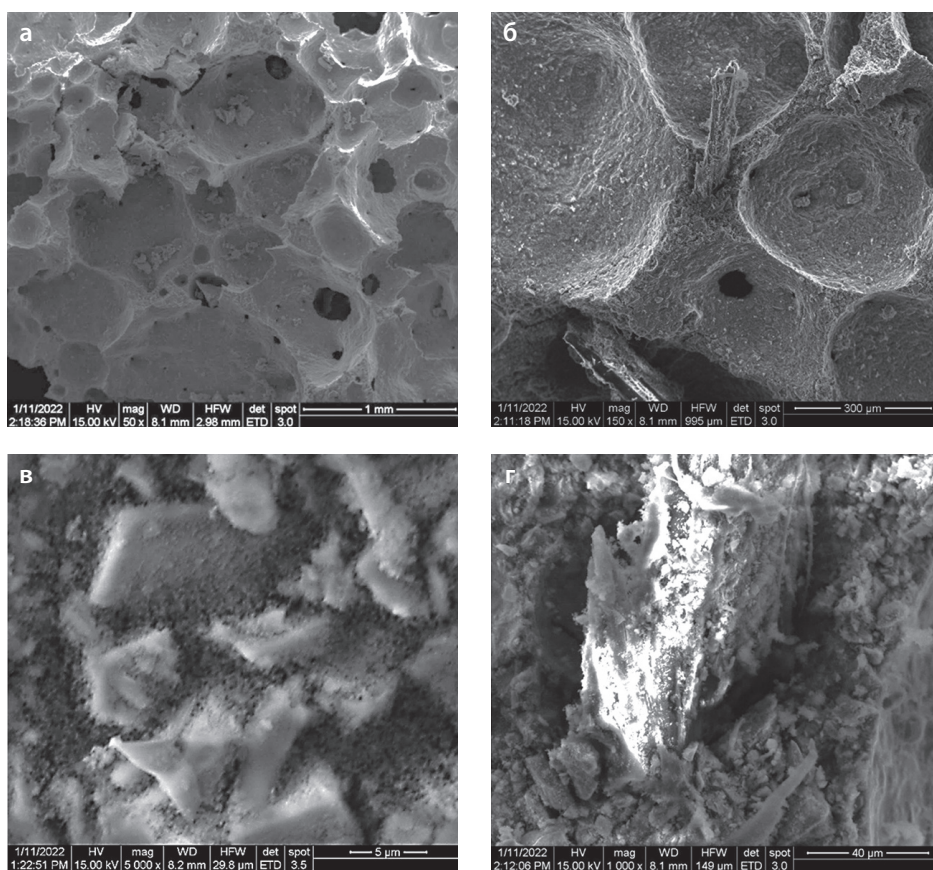


Рис. 5. Микрофотографии сколов пористого древесно-минерального композита на основе шлакосиликатного вяжущего в возрасте 28 сут при твердении в нормальных условиях: а – поры различного диаметра; б – распределение пор и древесины в объеме материала; в – гидроалюмосиликатные новообразования между частицами шлака; г – зона контакта древесины с минеральной матрицей

ная и относительно однородная структура (рис. 5г). Поверхность частиц древесины вследствие минерализующего действия затворителя также покрыта продуктами взаимодействия компонентов вяжущего, которые наблюдаются и в минеральной матрице материала. Минерализующее действие жидкого стекла оказывает положительное действие на стабилизацию свойств древесного заполнителя и его термическую стойкость, что согласуется с результатами термического анализа (рис. 4). Кроме того, гидролитическое действие щелочной среды вяжущего на компоненты древесины способствует формированию более плотного их контакта с минеральной матрицей (рис. 5г).

С точки зрения практического применения наиболее важными характеристиками для пористого древесно-минерального композиционного материала являются прочность, пористость, водопоглощение и теплопроводность. Для определения характера влияния соотношения исходных компонентов на прочность материала при сжатии была получена серия образцов в условиях нормального твердения. Массы сырьевых компонентов и значения прочности приведены в таблице 4.

Результаты исследований показали, что прочность при сжатии и плотность композита в большей степени коррелирует с долей шлака в исходной смеси. Зависимость прочностных характеристик

от содержания древесной дробленки в материале выражена менее явно. Например, доля древесины в образце № 3 является наибольшей (отношение древесина/шлак 0,43) среди всех представленных вариантов, тогда как прочность при сжатии принимает промежуточное значение (табл. 4). Образцы № 4 и 6 с высокой прочностью содержат средние количества древесины, образец № 7 с низкой долей древесины (отношение древесина/шлак 0,3) обладает самой низкой прочностью. Количество затворителя может варьироваться в узких пределах: при отношении жидкое стекло/шлак, равном 0,5 и менее, смесь характеризуется низкой удобоукладываемостью, и получаемый материал имеет неоднородную структуру; при отношении, большем 0,7, наблюдается отделение жидкости и расслоение образца. Наиболее воспроизводимые характеристики образцов материала с однородной пористостью получаются при оптимальном отношении жидкое стекло/шлак, равном 0,7.

Термообработка композиционного материала приводит к закономерному росту его прочности. На рис. 6 приведены результаты измерения прочности при сжатии образцов состава № 3 с наибольшей долей древесины (табл. 4) после их изотермического нагревания при 80 и 90 °С с различной продолжительностью.

Таблица 4. Соотношение сырьевых компонентов для получения пористого композиционного материала и его характеристики в возрасте 28 сут (твердение при нормальных условиях, отношение жидкое стекло/шлак 0,7)

Образец	Шлак, кг/м ³	Древесная дробленка, кг/м ³	Пенообразователь, кг/м ³	Бентонит, кг/м ³	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Прочность при сжатии R_{cp} , МПа
1	347	124	1,21	1,38	552	1,38
2	424	124	1,48	1,69	640	2,78
3	347	152	1,21	1,38	575	2,38
4	424	152	1,48	1,69	668	3,33
5	331	138	1,16	1,32	546	1,40
6	439	138	1,54	1,75	680	3,65
7	385	118	1,35	1,54	593	1,34
8	385	158	1,35	1,54	627	1,75
9	385	138	1,35	1,54	607	1,50

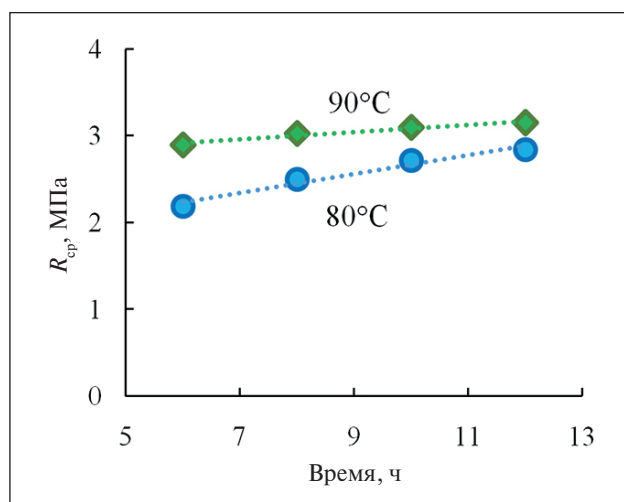


Рис. 6. Зависимость прочности при сжатии (R_{cp}) образцов древесно-минерального композита (состав № 3, табл. 4) от продолжительности их изотермического нагрева при различных температурах (относительная влажность воздуха не менее 90%)

Увеличение прочности материала при термообработке (рис. 6) происходит за счет повышения глубины взаимодействия компонентов шлакосиликатного вяжущего, увеличения прочности связывания частиц древесного заполнителя с минеральной матрицей и армирующей функции заполнителя. Сопоставление данных рис. 6 и табл. 4 показывает, что при термообработке может быть достигнуто повышение прочности материала на 15–20% по сравнению с образцами, полученными при нормальных условиях твердения. Термообработка при 90 °С и продолжительности 8–10 ч достаточна для достижения наибольших показателей прочности, увеличение

продолжительности нагревания нецелесообразно (рис. 6). Применение более низких температур снижает эффективность процесса получения материала за счет увеличения продолжительности нагрева, температуры выше 90 °С, что приводит к усиленному удалению воды, способствует деструкции и разупрочнению материала.

Водопоглощение древесно-минерального композита непосредственно связано с его пористостью и может существенно понижать прочность материала, прежде всего, за счет набухания частиц древесины и связанного с этим разупрочнения материала. Для оценки водопоглощения проводили взвешивание образцов со средними значениями содержания вяжущего и заполнителя (состав № 9, табл. 4) в исходной смеси, твердевших при нормальных условиях в течение 28 сут. По результатам определения прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии рассчитывали коэффициент размягчения материала как отношение прочностей влажного и сухого образцов. Результаты определения водопоглощения приведены в таблице 5.

Из характеристик водопоглощения следует, что полученный композиционный материал обладает низкой водостойкостью, во влажной среде прочность и морозостойкость такого материала будет

Таблица 5. Водопоглощение пористого древесно-минерального композиционного материала

Характеристика	Значение
Водопоглощение по массе W_m , %	74
Водопоглощение по объему W_v , %	45
Коэффициент размягчения K_p	0,63

существенно снижаться. Помимо проникновения в открытые поры вода впитывается частицами древесины, которые вследствие набухания также будут являться причиной разупрочнения материала. В действительности наблюдаемая тенденция свойственна для всех пористых и содержащих древесину материалов, поэтому такие материалы рекомендуется применять в условиях низкой влажности или защищать их от воздействия влаги (гидрофобизация поверхности, пропитка специальными составами).

Измерения теплопроводности образцов пористого композиционного материала со средними значениями плотности и прочности (составы № 3, 8, 9, табл. 4) показали, что среднее значение теплопроводности составляет порядка 0,08 Вт/(м·К). Полученные величины теплопроводности близки к таковым для арболита на портландцементе и существенно ниже, чем для пено- и газобетона, что подтверждает хорошие теплоизоляционные свойства материала.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлена возможность получения пористого композиционного древесно-минерального материала (аналог арболита) на основе шлакосиликатного вяжущего, древесной дробленки в качестве заполнителя, синтетического пенообразователя и ультрадисперсного алюмосиликатного стабилизатора пены (бентонита). Варьирование содержания молотого доменного шлака (330–440 кг/м³) и древесины (125–160 кг/м³) при оптимальных соотношениях жидкое стекло/шлак 0,7 и пенообразующая смесь/шлак 0,0035 (3,5% пенообразователя + 4% бентонита) позволяет получить композиционный материал плотностью 550–680 кг/м³, прочностью

при сжатии 1,35–3,65 МПа, открытой пористостью 45–50%, средней теплопроводностью 0,08 Вт/(м·К). Показано, что тепловлажностная обработка композита при 80–90 °С в течение 10–12 ч способствует набору прочности, которая при нормальном твердении достигается в течение 28 сут.

2. Стабилизация однородной пористой структуры полученного композиционного материала (размеры сферических пор менее 1 мм) достигается путем введения в пенообразующую смесь ультрадисперсной гелеобразующей добавки (бентонит) с размерами частиц 1–5 мкм. Частицы бентонита распределяются в стенках пузырьков пены, снижают их способность к коалесценции и упрочняют стенки пор в матрице минерального вяжущего в процессе схватывания за счет гелеобразования.

3. В ходе схватывания и твердения шлакосиликатного вяжущего образуются преимущественно аморфные продукты (гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция и натрия), доля кристаллических новообразований (кальцит, окерманит) не превышает 10%. Гидролитическое действие щелочной среды вяжущего на компоненты древесины способствует формированию более плотного их контакта с минеральной матрицей. Контактная зона шлакосиликатной матрицы с частицами древесного заполнителя имеет плотную однородную структуру, в ней присутствуют частицы гидроалюмосиликатов кальция в виде лепестков, которые образуются в областях скопления коллоидных частиц бентонита на границах раздела контактирующих фаз.

4. Полученный в работе пористый древесно-минеральный композиционный материал может быть использован для производства легких несущих конструктивных элементов, в качестве шумо- и теплоизоляционного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Miraldo S., Lopes S., Pacheco-Torgal F., Lopes A. Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes. *Construction and Building Materials*. 2021: 298:123729(1-26). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123729>
2. Gigar F.Z., Khennane A., Liow J.-L., Tekle B.H., Li Z. From Portland cement to alkali-activated system: advances in wood-cement composites for sustainable building applications. *Cleaner Materials*. 2026:19:100365(1-44). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100365>
3. Bouguerra A., Ledhem A., de Barquin F., Dheilly R.M., Quéneudec M. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*. 1998:28(8):1179–1190. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00075-1)
4. Sarmin S.N., Welling J., Krause A., Shalbafan A. Investigating the possibility of geopolymer to produce inorganic-bonded wood composites for multifunctional construction material – A Review. *BioResources*. 2014:9(4):7941–7950.
5. Bouguerra A., Amiri O., Ait-Mokhtar A., Diop M. Water sorptivity and pore structure of wood-cementitious composites. *Magazine of Concrete Research*. 2002:54:103–112. <https://doi.org/10.1680/mac.2002.54.2.103>
6. Siddique R. Properties of concrete incorporating high volumes of class f fly ash and san fibers. *Cement and Concrete Research*. 2004:34(1):37–42. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00192-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00192-3)
7. Jauberthie R., Rendell F., Tamba S., Cissé I.K. Properties of cement-rice husk mixture. *Construction and Building Materials*. 2003:17(4):239–243. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(03)00005-9)

8. Yagubkin, A., Shabanov, D., Niyakovskii, A., Romanovski V. Maximizing strength and durability in wood concrete (arbolite) via innovative additive control and consumption. *Biomass Conv. Bioref.* 2025;15:13365–13379. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06071-6>
9. Abdulwahid, M.Y., Akinwande, A.A., Kamarou, M., Romanovski V., Al-Qasem I.A. The production of environmentally friendly building materials out of recycling walnut shell waste: a brief review. *Biomass Conv. Bioref.* 2024; 4:24963–24972. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04760-2>
10. Muñoz S., Villena L., Tesen F., Coronel Y., Garcia J., Brast C. Influence of coconut fiber on mortar properties in masonry walls. *Electronic Journal of Structural Engineering.* 2023;23:52–58. <https://doi.org/10.56748/ejse.23391>.
11. Cabanillas Hernandez G., García Chumacero J.M., Villegas Granados L.M., Arriola Carrasco G.G., Marín Bardales N.H. Sustainable use of wood sawdust as a replacement for fine aggregate to improve the properties of concrete: a Peruvian case study. *Innov. Infrastruct. Solut.* 2024;9:233. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01567-6>
12. Koohestani B., Koubaa A., Belem T., Bussièrè B., Bouzahzah H. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler. *Construction and Building Materials.* 2016;121:222–228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118>
13. Quiroga A., Marzocchi V., Rintoul I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of populus euroamericana wood fibers. *Composites Part B: Engineering.* 2016;84:25–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>
14. Bederina M., Laidoudi B., Goullieux A., Khenfer M.M., Bali A., Quéneudec M. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials.* 2009;23(3):1311–1315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029>
15. Govin A., Peschard A., Guyonnet R. Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and Concrete Composites.* 2006;28(1):12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>
16. Ye H., Asante B., Schmidt G., Krause A., Zhang Y., Yu Z. Eco-friendly geopolymer-wood building materials: Interactions between geopolymer and wood cell wall. *Journal of Cleaner Production.* 2023;420:138381(1-10). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138381>
17. Ye H., Zhang Y., Yu Z., Mu J. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2018;173:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.028>
18. Al Bakri Abdullah M.M., Izzat A.M., Muhammad Faheem M.T., Kamarudin H., Khairul Nizar I., Bnhussain M., Rafiza A.R., Zarina Y., Liyana J. Feasibility of producing wood fibre-reinforced geopolymer composites (WFRGC). *Advanced Materials Research.* 2012;626:918–925. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.626.918>
19. Olayiwola H.O., Amiandamhen S.O., Meincken M., Tyhoda L. Investigating the suitability of fly ash/metakaolin-based geopolymers reinforced with south african alien invasive wood and sugarcane bagasse residues for use in outdoor conditions. *European Journal of Wood and Wood Products.* 2021;79(3):611–627. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01636-4>
20. Kielè A., Vaičiukynienė D., Tamošaitis G., Pupeikis D., Bistrickaitė R. Wood shavings and alkali-activated slag bio-composite. *European Journal of Wood and Wood Products.* 2020;78(3):513–522. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01516-x>
21. Sarmin S.N. The influence of different wood aggregates on the properties of geopolymer composites. *Key Engineering Materials.* 2016;723:74–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.723.74>
22. Berzins A., Morozovs A., Gross U., Iejavs J. Mechanical properties of wood-geopolymer composite. *Proc. 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*, 24.-26.05.2017 Jelgava, Latvia. 1167–1173. <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N251>
23. Gigar F.Z., Khennane A., Liow J.-L., Tekle B.H., Li Z. Characterisation of a novel sustainable wood-geopolymer masonry units. *Developments in the Built Environment.* 2024;20:100540(1-13). <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100540>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, samchenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3523-593X>

Коршунов Андрей Владимирович – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, korshunovav@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7585-0953>

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторами сделан эквивалентный вклад при подготовке публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 03.04.2026; принята к публикации 09.04.2026.