

Влияние полипропиленовой фибры на физико-механические свойства стеклодоломитовых листов

Юлия Вячеславовна Бикаева¹, Руслан Абдирашитович Ибрагимов¹,

Линур Рафаилевич Гимранов¹, Евгений Валерьевич Королев²

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из перспективных направлений развития строительного материаловедения является использование карбонатных материалов с невысоким содержанием оксида магния в качестве сырья для производства вяжущих и материалов на их основе. Актуальность применения фибрового армирования связана с необходимостью в значительной мере повысить физико-механические свойства стеклодоломитовых листов (СДЛ) на магнезиальном вяжущем. Введение полипропиленовой фибры позволит улучшить работу композиционного материала на изгиб, повысить трещиностойкость в процессе эксплуатации, снизить усадку при твердении. Цель исследования — определение оптимальной концентрации фибры и ее влияния на физико-механические свойства СДЛ.

Материалы и методы. Исследуемые материалы — СДЛ, получаемые путем смешивания обожженного доломита, водного раствора хлорида магния, добавок и фибрового армирования. Механическую активацию каустического доломита производили в аппарате вихревого слоя. Структура композита, морфология поверхности изучались с помощью электронной микроскопии. Оценка влияния параметров фибры на прочность модифицированных СДЛ выполнялась по смоделированной расчетной модели в программном комплексе Ansys.

Результаты. Представлены результаты зависимости прочности при изгибе и плотности, пористости образцов от концентрации, длины полипропиленовых волокон. Определены предельные значения напряжений при изгибе, вертикальные перемещения контрольных составов, армированных фиброй на исходном и механоактивированном вяжущем. Введен индекс пластичности для сравнения пластических деформаций материала и рассчитана величина сцепления фибрового волокна с матрицей.

Выводы. Установлено, что механомагнитная обработка магнезиального вяжущего в аппарате вихревого слоя способствует повышению предельной прочности на изгиб и остаточной прочности, повышает механические силы сцепления, а введение фибры исключает хрупкое разрушение образца.

Ключевые слова: полипропиленовая фибра, каустический доломит, магнезиальный камень, фиброволокно, сцепление, индекс пластичности

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00524 (URL: <https://rscf.ru/project/24-29-00524/>).

Для цитирования: Бикаева Ю.В., Ибрагимов Р.А., Гимранов Л.Р., Королев Е.В. Влияние полипропиленовой фибры на физико-механические свойства стеклодоломитовых листов//Вестник МГСУ.2025.Т.20.Вып.12.С.1920–1934. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1920-1934

Автор, ответственный за переписку: Юлия Вячеславовна Бикаева, ulyaevstigneeva@mail.ru.

The influence of polypropylene fibre on the physical and mechanical properties of glass-dolomite sheets

Yuliya V. Bikaeva¹, Ruslan A. Ibragimov¹, Linur R. Gimranov¹, Evgenii V. Korolev²

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the promising areas for the development of construction materials is to use carbonated materials with a low magnesium oxide content as raw materials for the production of binders and the manufacture of materials based on them. The relevance of the application of fibreglass reinforcement is related to the need to significantly increase the physical and mechanical properties of fibreglass dolomite sheets from magnesia binder. The introduction of polypropylene fibres will improve bending performance of composite material, increase in-service crack resistance and reduce shrinkage during hardening. The aim of the study was to select the optimal fibre concentration and determine its influence on the physical and mechanical properties of glass fibre dolomite sheets.

Materials and methods. The materials studied are glass dolomite sheets obtained by mixing burned dolomite, water solution of magnesium chloride, additives and fibrous reinforcement. The mechanical activation of the caustic dolomite was produced in a vortex layer device. The structure of the composite and the surface morphology were investigated by electron microscopic analysis. The influence of fibre parameters on the strength of the reinforced sheet was evaluated by a designed calculation model in the Ansys software complex.

Results. The results of the dependence of bending strength and specimen density on by concentration, length of polypropylene fibres are presented. The limit values of the stresses when bending, vertical movements of the unreinforced sheet, reinforced by fibres on the non-activated and mechanical activated binder are determined. A plasticity index for comparing the plastic deformations of the material was introduced and the value of fibre adhesion to the matrix was calculated.

Conclusions. It was established that the mechanical treatment of magnesium binder in a vortex layer device increases bending and residual strength, increases impact force, and the introduction of fibre prevents brittle fracture of the specimen.

KEYWORDS: polypropylene fibre, caustic dolomite, magnesia stone, fibre, adhesion, plasticity index

Acknowledgements. The work was carried out with a grant from the Russian Science Foundation № 24-29-00524 (URL: <https://rscf.ru/project/24-29-00524/>).

FOR CITATION: Bikaeva Yu.V., Ibragimov R.A., Gimranov L.R., Korolev E.V. The influence of polypropylene fibre on the physical and mechanical properties of glass-dolomite sheets. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(12):1920–1934. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1920-1934 (rus.).

Corresponding author: Yuliya V. Bikaeva, uliyaevstigneeva@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В сфере производства строительных материалов постоянно повышаются требования к качеству готовой строительной продукции. Одним из способов достижения высоких физико-механических характеристик готовых изделий может быть использование фибрового армирования.

Особый интерес представляют исследования, направленные на улучшение свойств строительных материалов из доступного [1], легкообрабатываемого, низкообжигового сырья [2, 3]. В силу широкого распространения месторождений магнезита и других карбонатных пород [4, 5], низких энергозатрат на обжиг, высокой активности частиц MgO [6–8] и вариативности изделий магнезиальные вяжущие находят все большее применение в промышленности строительных материалов.

При использовании стекловолоконной сетки [9] в получаемом двухслойном стеклоуглеродном композите происходит перераспределение внутренних сил за счет большей деформации образцов. По результатам испытаний стекло-фибро-армированного полимера [10] была разработана модель пластичности повреждений бетона в виде конечно-элементной нелинейной модели [11, 12].

Систематически исследуются композиты с экологически чистыми добавками. Применение строительных отходов древесины улучшает прочность плит из магнезита на изгиб и их водостойкость [13, 14]. Композиты из магнезиального бетона и древесины обладают низкой теплопроводностью, высокой остаточной прочностью после воздействия высоких температур и погружения в воду [15], высоким шумопоглощением [16, 17].

Авторами Y. Wang, L. Wei [18] изучены физико-химические характеристики фиброармированного композита на основе магнезиального цемента и полиэтиленового волокна. Прочность на растяжение магнезиального камня при введении добавки состави-

ла 7 МПа. Вследствие отличного химического связывания фибры и магнезиального цемента снизилась хрупкость листов, повысилось предельное значение растягивающего напряжения до 8 % и способность композита к деформационному упрочнению [19]. Корреляционную связь полиэтиленовой фибры и матрицы магнезиального цемента также отметили K. Yu, Y. Guo, цементирующийся композит из магнезиального цемента [20] уже на ранних сроках твердения достиг прочности на изгиб 84 % от максимального значения 25,2 МПа и обладал высокими показателями предельной прочности на сжатие в возрасте 28 сут — 127 МПа. Показано, что полиформальдегидная фибра, обработанная HNO_3 и NaOH , усиливает шероховатость благодаря росту наноразмерных кристаллов цемента в микропорах [21]. F. Ahmad, S. Rawat [22, 23] решили проблему хрупкости и сниженной прочности, присущей магнезиальному камню, путем модификации магнезиального цемента гибридным усиленным волокном, состоящим из смеси полиэтиленовых и базальтовых волокон. За счет высокой дисперсии гидрофильных волокон в матрице магнезиального камня с кристаллами игольчатой формы оксихлорида магния формируется плотная микроструктура с улучшенным сцеплением с фиброй. Тем не менее именно в гибридных смесях обнаруживается высокая агломерация волокон фибры, что приводит к развитию зон концентраций напряжений, слабого соединения с матрицей и пониженному значению прочности материала.

Авторы L. Wang, Tingshu He и соавт. [24] определили три вида фибровых волокон: полипропиленовые, полиакрилонитриловые и из поливинилового спирта по шкале наибольшего эффекта на свойства бетона. Увеличение длины волокна с 10 до 20 мм снизило усадочные деформации материала на 5,1–7 %, повысило прочность на растяжение на 7,9–9,2 %, улучшило морозостойкость и одновременно увеличило относительную проницаемость на 28–47 %.

Однако до сих пор остаются малоизученными вопросы определения влияния полипропиленовой фибры на прочность стеклодоломитовых листов (СДЛ) на основе магнезиального вяжущего, а также установления прочности сцепления фибрового волокна и матрицы.

Цель настоящего исследования — оценка физико-механических свойств стеклодоломитовых листов, армированных полипропиленовой фиброй, в том числе полученных механомагнитной активацией каустического доломита в аппарате вихревого слоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Магнезиальное вяжущее получали обжигом доломитизированного известняка Матюшинского месторождения с содержанием $MgO = 20\%$ при температуре $800^{\circ}C$ в течение 35–45 мин. Затворяли вяжущее солевым раствором хлорида магния $MgCl_2 \cdot 6H_2O$. Плотность затворителя составила $1080\text{--}1250\text{ кг/м}^3$.

В качестве добавок использовали:

- пластифицирующую добавку — лигносульфат технический (ЛСТ) на основе солей лигносульфоновых кислот в дозировке 1 % от массы каустического доломита [25];
- полипропиленовую фибру производства «Си-Айрлайд»; модуль упругости не менее 10^4 МПа , прочность на разрыв 550 МПа , удлинение до 20 %; площадь поверхности волокна $150\text{ м}^2/\text{кг}$. Фибра длиной 3; 12; 18; 32 мм вводилась в количестве 2 % от объема образца согласно рекомендациям ГОСТ 14613–83¹, фибра длиной 6 мм — в количестве 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 %. Поверхность волокон фибры дополнительно модифицирована введением в расплав оболочки активных соединений, содержащих одну или несколько полярных групп OH , $COOH$, NH_2 , $SiOH$, OSO_3H [26];
- метакаолин в дозировке 0–10 % от массы вяжущего производства «Пласт-Рифей».

С целью определения прочности при изгибе СДЛ изготавливали по 3 образца в каждой серии, при установлении прочности при сжатии — по 6 образцов.

Образцы готовили в следующей последовательности: к водному раствору хлорида магния с отношением $MgCl_2 \cdot H_2O = 1:0,375$ вводили пластификатор в количестве 1 %. Затем в отдельной емкости перемешивали сухие компоненты — каустический доломит и метакаолин. Далее затворяли полученную однородную смесь приготовленным водным раствором и получали магнезиальное тесто нормальной густоты. Фибру добавляли перед заливкой смеси в опалубочные формы и равномерно распределяли по объему массы.

Для изготовления составов, полученных механомагнитной активацией, использовали аппарат вихревого слоя (ABC) VORTEXPROM, где обрабаты-

вали каустический доломит совместно с пластификатором в количестве 1 %. Приняли следующие параметры активации: время активации — от 4,5 до 5,5 мин; частота вращения электромагнитного поля — 70 Гц; отношение d ферримагнитных тел к их длине l — 0,12; отношение массы ферримагнитных тел к массе измельчаемого материала — 0,4.

Нормальная густота магнезиального теста определялась по прибору Вика. Образцы для испытаний выполнялись двух видов: кубы размером $20 \times 20 \times 20$ мм для установления прочности на сжатие и плитки размером $105 \times 70 \times 10$ мм с целью определения прочности на изгиб. Испытания проводились через 14 сут нормально-влажностного твердения.

Открытая капиллярная пористость образцов определялась по методике ГОСТ 12730.4².

При подборе длины фибры необходимо руководствоваться возможностью ее распределения в матрице в зависимости от толщины разрабатываемого изделия, например листового материала. В таком случае в процессе изготовления армированного листа с добавлением базальтовой или металлической фибры с длиной волокна, превышающей толщину готового изделия, могут возникнуть технологические трудности при формировании. При использовании полипропиленовой фибры возможно применение волокон до 32 мм, так как за счет эластичности волокна в ходе перемешивания фибра распределяется по всему объему, а незначительная шероховатость внешней стороны СДЛ может быть устранена шлифовкой. Испытание СДЛ на изгиб осуществлялось по схеме трехточечного изгиба с шарнирными опорами, расположенными симметрично на нижней траверсе (рис. 1) на универсальной испытательной машине ИР 5082-200 (погрешность $\pm 1\%$ в диапазоне от 0,02 % от максимального предела 200 кН, регистрация перемещений с разрешением 0,001 мм и передача данных на компьютер для анализа).

Электронную микроскопию выполняли на автомаршисонном высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе Merlin (Carl Zeiss) (Германия). Зафиксированные на держатель образцы помещались в камеру вакуумной установки Quorum Q 150T ES (Великобритания). Нанесение проводящего слоя проводилось методом катодного распыления сплавом Au/Pd в соотношении 80/20. Толщина нанесенного слоя составила 15 нм.

Съемка морфологии поверхности осуществлялась на дополнительном оснащении микроскопа — спектрометре энергетической дисперсии AZtec X-Max (Oxford instruments, Великобритания) при ускоряющем напряжении первичных электронов 5 кВ и зондовом токе 300 А для минимального воздействия на объект исследования.

¹ ГОСТ 14613–83. Фибра. Технические условия. 1985. 28 с.

² ГОСТ 12730.4. Бетоны. Методы определения параметров пористости. 2021. 12 с.

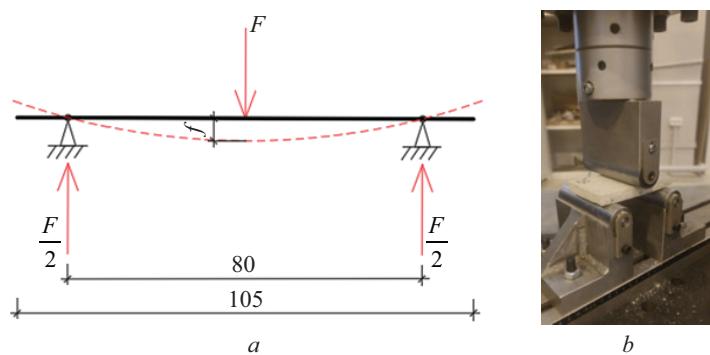


Рис. 1. Испытание СДЛ: *a* — расчетная схема; *b* — испытание лабораторных образцов СДЛ на прочность при изгибе
Fig. 1. Glass dolomite sheets (GDS) test: *a* — model of structure; *b* — bending strength of GDS laboratory specimens

Для приблизительной качественной оценки потенциального влияния того или иного параметра на прочность армированного материала в программном комплексе Ansys была смоделирована расчетная модель с применением стохастических подходов в формировании отдельных элементов.

В среде программирования Python разработан скрипт для создания случайного положения фибры в заданном геометрическом объеме $h \times b \times L$ (рис. 2). Каждая фибра моделировалась сплайном длиной l . Кривизна фибры определялась порядком

сплайна ($k = 1$ — прямая, $k = 3$ — 3 точки перегиба) и параметром искривленности c_{ε} , равным диапазону отклонения промежуточных точек сплайна от линии, соединяющей его начало и конец.

При моделировании фибры допущены следующие предпосылки: 1) поскольку фибра обладает поперечным сечением, измеряемым в микронах, было предположено слипание волокон в более крупные кластеры с поперечным сечением менее 0,5 мм; 2) расположение фибры внутри объема образца носят случайный характер; 3) кривизна фибр является

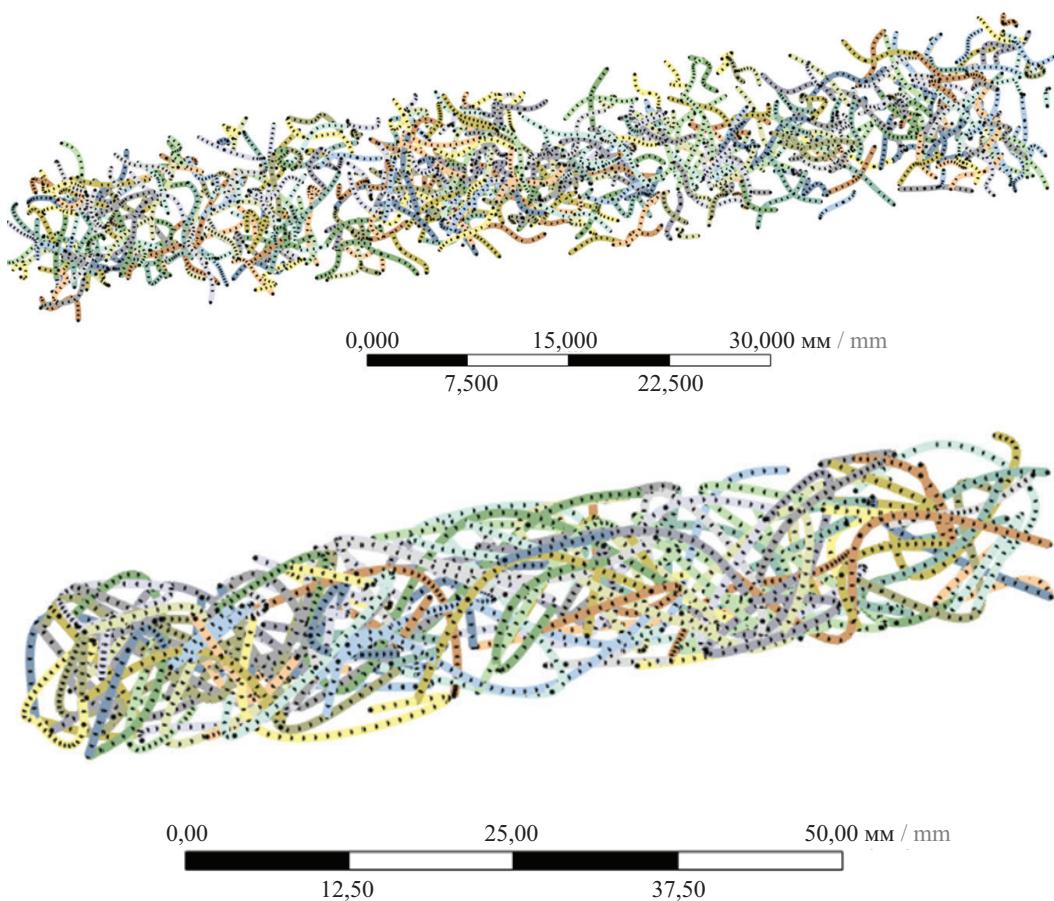


Рис. 2. Фибра в расчетной модели, созданной стохастическим подходом

Fig. 2. Fibre in the calculation model created by stochastic approach

сложной функцией, состоящей из многих параметров, поэтому сначала задается произвольной величиной; 4) количество элементов, моделирующих кластер из фибр, устанавливалось исходя из заданного объема фибры в образце и принято равным около 2 %; 5) рассматривались варианты фибры длиной 6 и 32 мм. Количество фибр и их уточненный диаметр определялись из следующего соотношения:

$$\frac{V_f}{V_c} = \frac{n\pi d^2 l}{4hbl}, \quad (1)$$

где V_f — объем фибры; V_c — объем образца; n — количество кластеров фибры; d — диаметр фибры.

Из данного соотношения и заданного объема фибры 2 % в матрице магнезиального камня заданы следующие параметры для создания расчетной модели:

- фибра длина $l = 6$ мм количеством $n = 500$ шт.; фибра длина $l = 32$ мм количеством $n = 98$ шт. Диаметр волокна $d = 0,26$ мм, модуль упругости $E = 1500$ МПа, объем фибры 154 мм 3 ;
- материал блока размерами $10 \times 10 \times 80$ мм, модуль упругости 3000 МПа. Предел прочности при изгибе — $6,5$ МПа, объем блока — 8000 мм 3 .

Расчет осуществлялся в физически нелинейной постановке. Ко всем образцам прикладывалась нагрузка 600 Н; расчет выполнялся программой до тех пор, пока обеспечивалась сходимость критерия нелинейного расчета. Разрушающая нагрузка принималась по достижению потери данной сходимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определено влияние длины фибрового армирования в количестве 2 % на прочность при изгибе СДЛ. Результаты испытаний приведены на рис. 3. Выявлено, что при сравнении с контрольным составом (без фибрового армирования) наибольшее

увеличение прочности на изгиб в 1,45 раза наблюдается при введении фибры длиной 6 мм. При введении фибры длиной более 6 мм прочность образцов снижается с 12 до $11,5$ МПа, при этом значение плотности образцов СДЛ находится в диапазоне 1720 – 1790 кг/м 3 .

Увеличение размера фибры не влечет за собой резкого понижения прочности, однако повышает вязкость смеси. Фибра способствует снижению скорости роста волосяных трещин в магнезиальном камне. С введением фибры значение пористости образцов повышается в 1,3–1,6 раза.

Установлено влияние концентрации фибры длиной 6 мм на прочность при изгибе СДЛ. Фибра вводилась в смесь в объеме 0,5–2,5 %. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

При концентрации фибры от 0,5 до 2 % наблюдается постепенный рост прочности при изгибе СДЛ.

Максимальное значение прочности СДЛ достигается при объемной концентрации фибры длиной 6 мм, равной 2 %. Увеличение концентрации фибры снижает плотность, создает рыхлую структуру в камне, что приводит к сокращению прочности сцепления фибры с матрицей.

Для обеспечения максимальной гидратации MgO, повышения удельной поверхности частиц вяжущего каустический доломит обрабатывали в аппарате вихревого слоя совместно с пластификатором ЛСТ в количестве 1 %. Механомагнитная активация в АВС с добавлением небольшого количества концентрированной водной суспензии пластификатора ЛСТ может привести к значительному увеличению удельной поверхности каустического доломита. Так, в работе Г.С. Ходакова [27] механоактивация сухих порошков с введением 1 % воды существенно повышала их удельную поверхность.

Выявлено, что среднее значение прочности при изгибе СДЛ, полученных механомагнитной

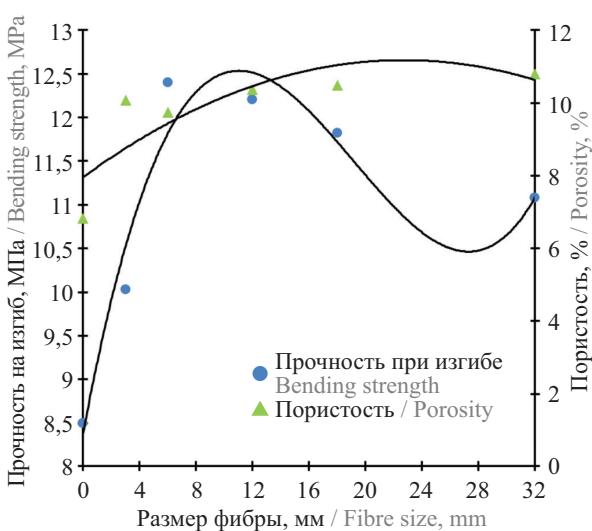
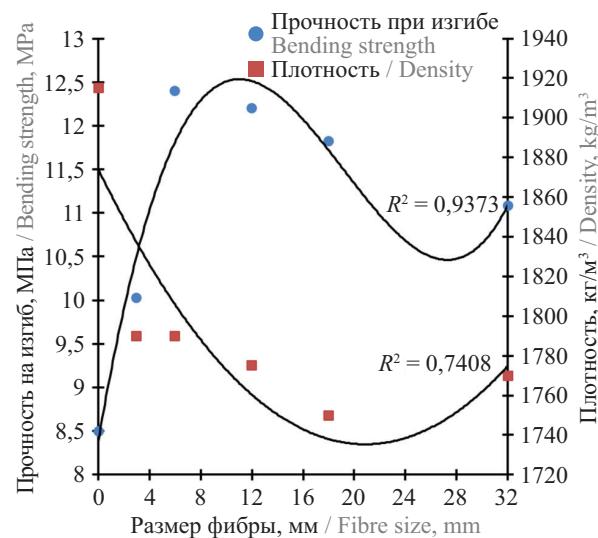


Рис. 3. Зависимость прочности на изгиб СДЛ от размера фибры при концентрации 2 %, плотность и пористость образцов
Fig. 3. The relation of bending strength of GDS on fibre size at a concentration of 2 %, density and porosity of specimens

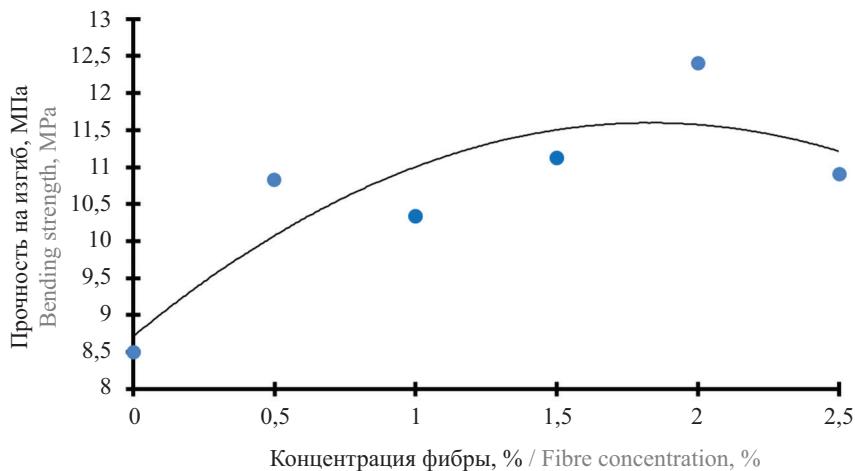


Рис. 4. Зависимость прочности на изгиб СДЛ от концентрации фибры длиной 6 мм

Fig. 4. The dependence of the bending strength of GDS on a fibre concentration of 6 mm length

активацией каустического доломита с добавлением фибры длиной 6 мм при ее концентрации 2 %, составило 18,7 МПа, что в 2,2 раза превышает значение контрольного образца без добавления фибры и в 1,5 раза состава, полученного без активации, но армированного той же фиброй. Из данных, представленных на рис. 5, видно, что у всех образцов протекает плавное возрастание напряжений во время приложения нагрузки.

В случае неармированного магнезиального камня образец хрупко разрушается при достижении нагрузки, превышающей предел прочности материала. Использование активированного вяжущего позволяет повысить допускаемую предельную нагрузку на СДЛ до 18 МПа с меньшими вертикальными перемещениями, а также повысить величину остаточной прочности образца. Так, на образцах, выдержавших нагрузку в 17,12 МПа, полипропи-

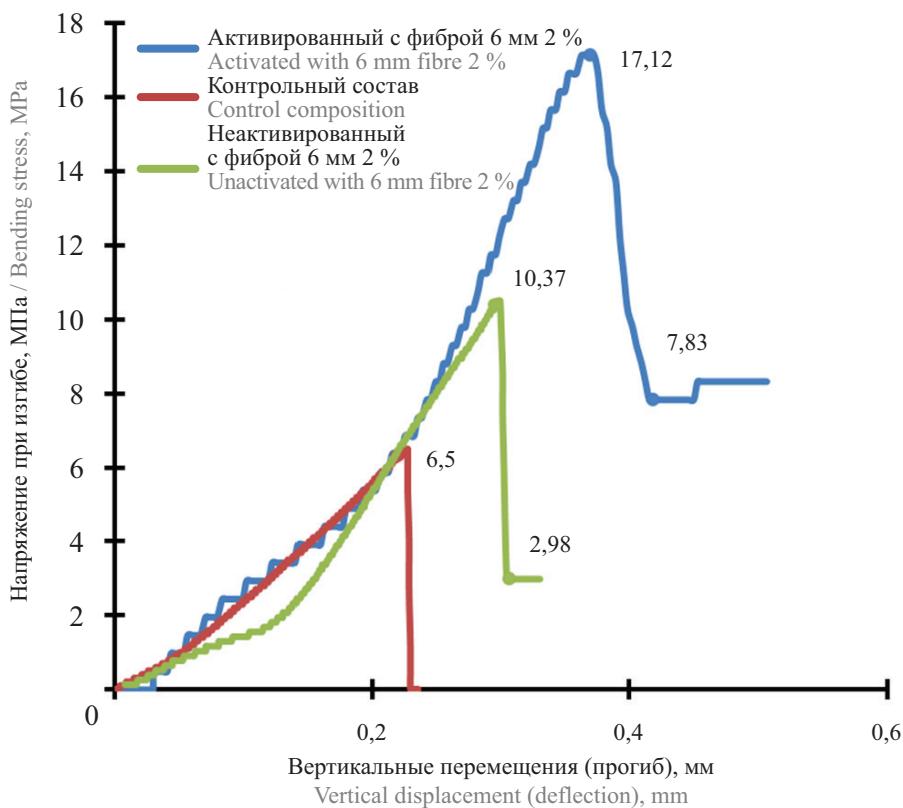


Рис. 5. График зависимости вертикальных перемещений при изгибе СДЛ от напряжений

Fig. 5. The diagram of GDS vertical bending displacement from stress

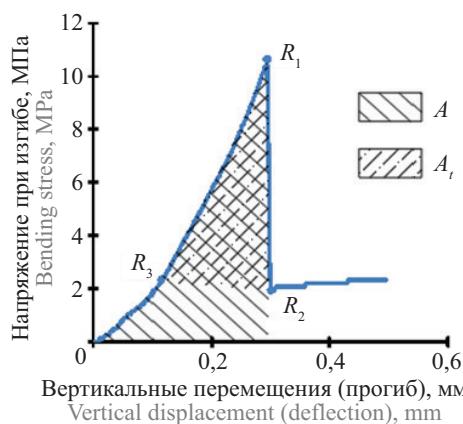


Рис. 6. Определение площади A_t по трем точкам на графике «напряжение – деформация»

Fig. 6. The determination of the area A_t at three points on the stress – strain curve

леновые волокна сдерживают распространение образующихся микротрещин. Это отражается сначала в снижении прочности образцов на 33 %, затем медленном росте напряжений до 82 % от максимального значения.

Для анализа способности восприятия остаточных деформаций материалом, армированным фиброй, применяют индекс пластичности. Расчет индекса пластичности проводится с использованием кривых «нагрузка – деформация». Индекс пластичности I_d определяется как отношение между общей площадью под кривой «нагрузка – деформация» и площадью упругой части той же кривой.

Авторами введен критерий $k_p = A/A_t$ для сравнения величины пластических деформаций, где A — площадь под кривой эпюры нормальных напряже-

ний и вертикальных перемещений; A_t — площадь треугольной области с вершинами в трех точках: при максимальной нагрузке R_1 , предельной нагрузке разрыва волокон R_2 , нагрузке второй фазы трещиногенерации $R_3 = R_2$ (рис. 6).

Из данных, приведенных на рис. 6, видно, что площадь A_t не может быть больше площади A . Рассмотрим два возможных варианта соотношения этих величин: в случае хрупкого разрушения, недостаточного сцепления фибры с матрицей магнезиального камня (или отсутствия фибры) $A_t = A$, тогда отношение $A/A_t = 1$; в случае $A_t < A$, где прочность $R_2 \approx R_1$, критерий $A/A_t \rightarrow \infty$. В последнем случае авторы считают, что прочность сцепления с фиброй равна прочности матрицы СДЛ на изгиб.

В табл. 1 представлены результаты испытаний и анализ эпюр напряжений образцов с различной длиной фибры и ее концентрацией. Согласно введенному критерию, фибра повышает пластичность образцов при изгибе в 2 раза. При сравнении отношений изменения прочности на растяжение при изгибе касательных напряжений к нормальным наблюдается тенденция увеличения коэффициента от 0,4 до 0,65 при росте концентрации фибры в магнезиальном камне от 0,5 до 2 %.

Величина сцепления фибрового волокна с матрицей не обработанного (2) и обработанного в АВС (3) магнезиального камня была рассчитана по методике, разработанной в СПбГАСУ и представленной в работах [28, 29]:

$$(\varphi\varphi)^{\text{peak}} = \frac{R_{\text{фн}} - 3,5 \cdot R_{\text{кз}} \cdot \mu_{\min} - R_{\text{нк}} (1 - 4,5 \cdot \mu_{\min})}{2 \cdot l_{\phi} / d_{\phi} \cdot \mu_{\min}}; \quad (2)$$

Табл. 1. Характеристики испытанных образцов

Table 1. Characteristics of the test specimens

Характеристика образцов: длина, концентрация фибры Specimen characteristics: length, fibre concentration	R_{14} среднее значение прочность при изгибе R_{14} mean bending strength	Характеристики, вычисленные по эпюре напряжений Characteristics calculated by stress distribution diagram				
		A , площадь, МПа·мм, среднее значение A , mean value of area, MPa·mm	R_t напряжение на площадке «текучести» R_t stress at the area of fluidity	$R_t/R_{\text{изг}}$	Площадь текучести A_t , МПа·мм Area of fluidity A_t , MPa·mm	k_p
Без фибры Without fibre	8,5 100 %	0,88	—	—	—	1,00
6 мм / mm 2 %	12,4 146 %	1,48	3,37	0,28	0,73	2,03
12 мм / mm 2 %	10,8 127 %	1,33	2,62	0,24	0,66	2,00
18 мм / mm 2 %	11,825 139 %	1,35	3,47	0,30	0,59	2,31
32 мм / mm 2 %	11,08 130 %	1,41	3,00	0,29	0,66	2,14

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Характеристика образцов: длина, концентрация фибры Specimen characteristics: length, fibre concentration	R_{14} среднее значение прочность при изгибе R_{14} mean bending strength	Характеристики, вычисленные по эпюре напряжений Characteristics calculated by stress distribution diagram				
		A , площадь, МПа·мм, среднее значение A , mean value of area, MPa·mm	R_t напряжение на площадке «текучести» R_t stress at the area of fluidity	$R_t/R_{изг}$ R_t/R_{bend}	Площадь текучести A_r , МПа·мм Area of fluidity A_r , MPa·mm	k_p
6 мм / mm 0,5 %	10,825 127 %	2,67	4,65	0,42	0,98	2,71
6 мм / mm 1 %	10,335 122 %	2,54	5,83	0,56	0,57	4,44
6 мм / mm 1,5 %	11,12 131 %	2,90	6,25	0,57	0,67	4,35
3 мм / mm 2 %	10,025 118 %	3,77	6,54	0,65	0,74	5,08
Активированный состав с 6 мм 2 % Activated composition with 6 mm fibre 2 % concentration	18,747 221 %	3,91	9,41	0,56	0,78	5,34

$$(\varphi\rho)^{ак} = \frac{R_{фц}^{ак} - 3,5 \cdot R_{кз}^{ак} \cdot \mu_{min} - R_{цк}^{ак} (1 - 4,5 \cdot \mu_{min})}{2 \cdot l_{\phi} / d_{\phi} \cdot \mu_{min}}, \quad (3)$$

где $R_{фц}$, $R_{кз}^{ак}$ — среднее значение прочности на изгиб армированных фиброй образцов СДЛ из неактивированного/активированного вяжущего, МПа; $R_{кз}$, $R_{цк}^{ак}$ — прочность контактной зоны ($R_{кз} = 1,4 \times R_{цк}$), МПа; μ_{min} — объемная доля фибры, соответствующая такому процентному содержанию, после которого наблюдается устойчивое повышение прочности; $R_{цк}$, $R_{цк}^{ак}$ — среднее значение прочности на изгиб образцов магнезиального камня из неактивированного/активированного вяжущего каустического доломита, МПа; l_{ϕ} — длина фибры, мм; d_{ϕ} — диаметр фибры, мм.

Результаты определения значения величины сцепления фибры с матрицей для образцов с различной концентрацией и размером волокон представлены в табл. 2.

По информации, приведенной в табл. 2, видно, что введение фибры длиной более 6 мм снижает значение сцепления с магнезиальным камнем. Обработка каустического доломита в АВС позволяет повысить прочность магнезиального камня, при этом значение прочности сцепления с полипропиленовой фиброй в СДЛ повышается на 40 %.

Эффективным армированием в случае использования неактивированного вяжущего для производства магнезиальных листов является армирование полипропиленовой фиброй длиной 6 мм концентрацией от 0,5 до 1 %. Электронные фотографии фибры в СДЛ показаны на рис. 7.

Табл. 2. Характеристики испытанных образцов

Table 2. Characteristics of the test specimens

Длина на фибры, мм Fibre length, mm	Объемное содержание, % Volume content, %	$R_{фц} / R_{fs}$	$R_{кз} / R_{cz}$	$R_{цк} / R_{ms}$	μ	l_{ϕ} / l_f	d_{ϕ} / d_f	$\varphi\tau$
—	—	8,5	11,9	8,5	—	—	—	—
6	2	12,4	11,9	8,5	0,02	6	0,02	1,29
12	2	10,8	11,9	8,5	0,02	12	0,02	0,38
18	2	11,82	11,9	8,5	0,02	18	0,03	0,55
32	2	11,08	11,9	8,5	0,02	32	0,03	0,24
6	0,5	10,82	10,2	8,5	0,005	6	0,02	0,77

Длина фибры, мм Fibre length, mm	Объемное содержание, % Volume content, %	$R_{\phi\phi} / R_{fs}$	$R_{\kappa\kappa} / R_{cz}$	$R_{\mu\mu} / R_{ms}$	μ	l_{ϕ} / l_f	d_{ϕ} / d_f	$\varphi\tau$
6	1	10,33	11,9	8,5	0,01	6	0,02	0,61
6	1,5	11,12	11,9	8,5	0,015	6	0,02	0,87
3	2	10,02	11,9	8,5	0,02	3	0,015	1,01
6*	2	18,74	18,596	13,28	0,02	6	0,02	1,81

Примечание: * — состав, полученный механомагнитной активацией.

Note: * — composition obtained by means of a mechanical magnetic activation.

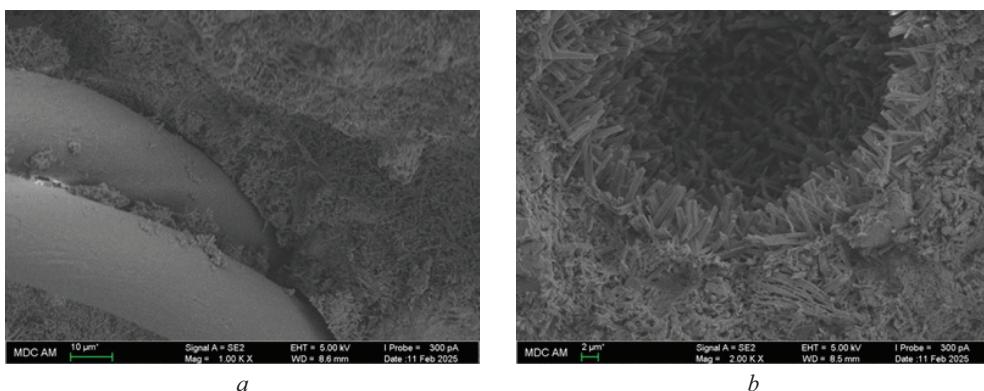


Рис. 7. Электронные фотографии образцов армированного стеклодоломитового листа из активированного в АВС магнезиального вяжущего: *a* — волокна фибры в матрице магнезиального камня; *b* — заполнение матрицы продуктами гидратации магнезиального камня — гидрооксихлоридом магния

Fig. 7. Electronic photos of the specimens of glass fibre reinforced sheet from magnesia binder activated in VLD (vortex layer device): *a* — fibre in magnesia stone matrix; *b* — filling of the matrix with hydration products of magnesia stone — magnesium hydroxylchloride

По данным, представленным на рис. 7, видно, что прочность сцепления полипропиленовой фибры с матрицей осуществляется за счет механических сил адгезии. При этом пространство между фиброй и матрицей заполняется гидрооксихлоридом магния, имеющим продолговатые волокнистые образования. За счет активного поверхностного слоя волокон отмечается формирование центров кристаллизации, идентифицируемых в виде сростков кристаллогидратов вокруг фибры.

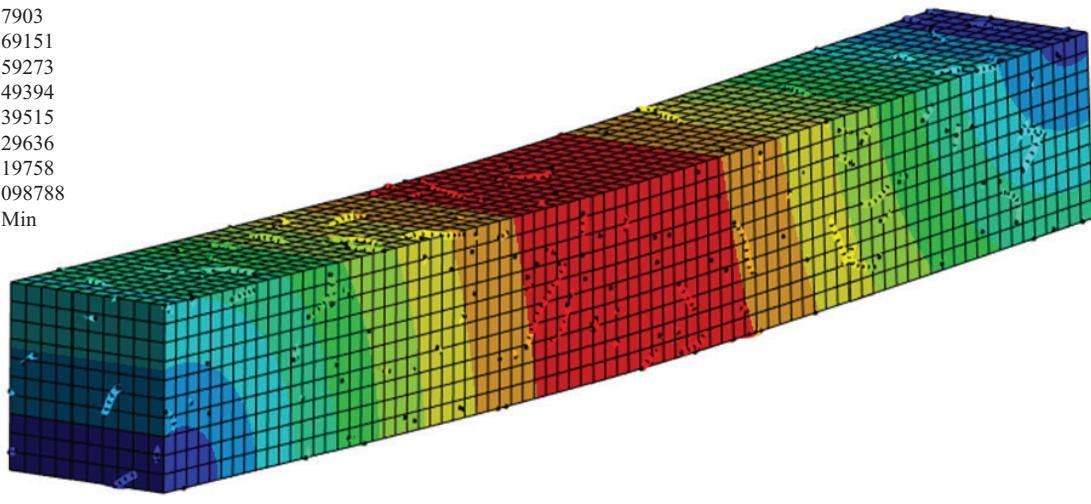
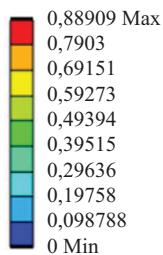
Полученные экспериментально значения прочности при изгибе подтверждаются результатами моделирования СДЛ, армированных фиброй длиной 6 и 32 мм (рис. 8). По результатам моделирования выявлено, что наибольшей прочностью на изгиб обладают образцы, армированные фиброй длиной 6 мм, что согласуется с экспериментальными данными.

Моделирование позволяет получить качественные результаты прогнозирования напряженно-деформированного состояния образцов с целью выбора оптимального типа армирования, отвечающего заданным условиям эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

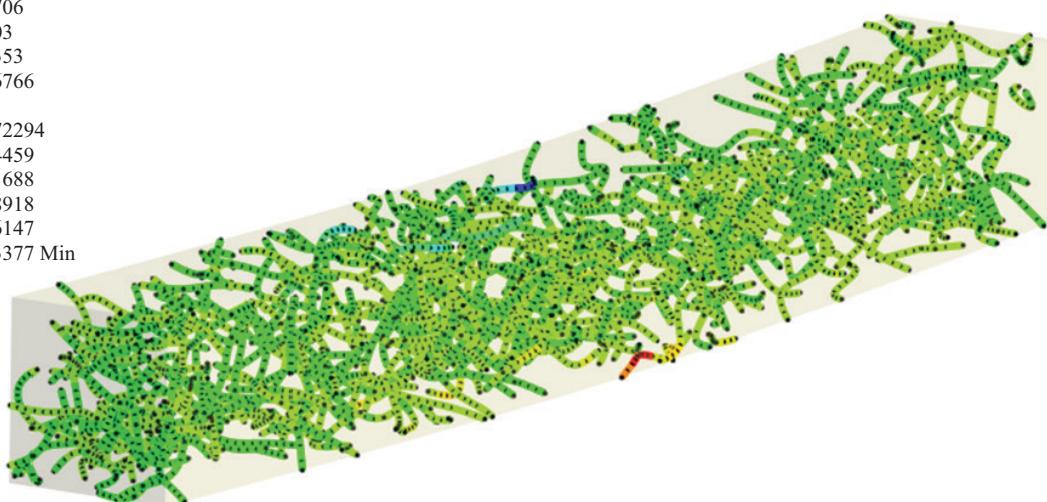
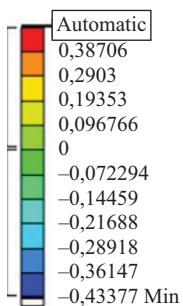
Определено влияние модификации полипропиленовой фибры различной длины на прочность при изгибе стеклодоломитовых листов. В результате экспериментальных и теоретических работ установлено наиболее эффективное армирование полипропиленовой фиброй стеклодоломитовых листов: максимальные значения прочности при изгибе наблюдаются при введении фибры длиной 6 мм и ее объемной концентрации 1,5–2 %.

D: 6 mm
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 0,214 s



a

D: 6 mm
Axial Force
Type: Directional Axial Force (X Axis) (Unaveraged)
Unit: N
Solution Coordinate System
Time: 0,214 s



b

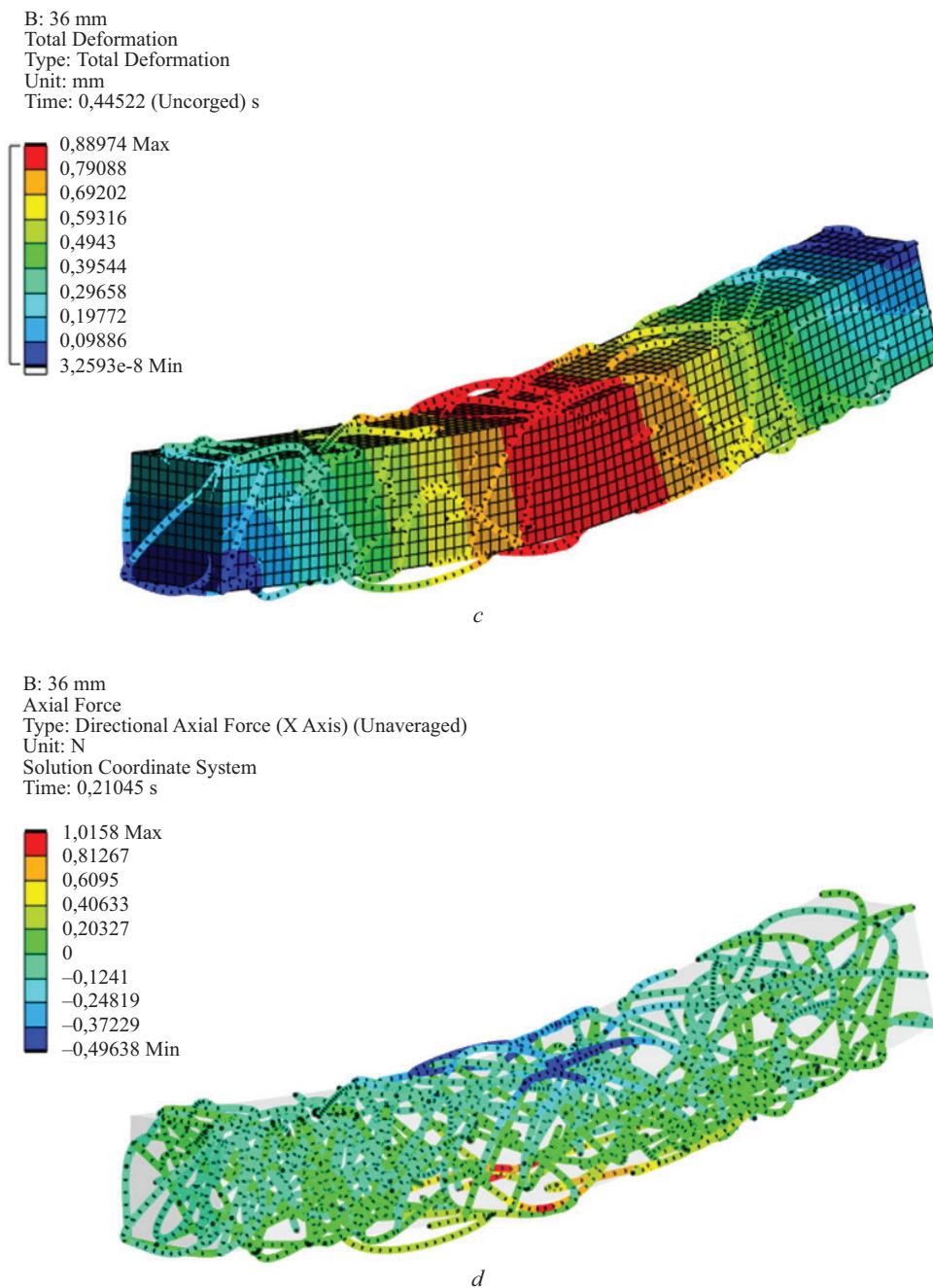


Рис. 8. Результаты моделирования: *a, b* — общая деформация в момент разрушения образца с фиброй длиной 6 и 32 мм; *c, d* — растягивающие усилия в фибре в момент разрушения длиной 6 и 32 мм

Fig. 8. Simulation results: *a, b* — overall deformation at the moment of rupture of the specimen with fibrous length 6 and 32 mm; *c, d* — tensile forces in the fibrous at breaking point with length 6 and 32 mm

Введен критерий пластичности k_p , на основании которого выявлено, что введение фибры длиной 6 мм при концентрации 1,5 % позволяет повысить значение k_p в 4,35 раза, а дополнительный технологический прием — mechanomagnитная активация каустического доломита — повышает значение k_p в 5,34 раза. Кроме того, mechanomagnитная активация

значительно повышает прочность сцепления фибры с матрицей стеклодоломитовых листов (в 1,4 раза по сравнению с составом без активации), что по данным электронной микроскопии обусловлено механическими силами адгезии фибры и матрицы; заполнением порового пространства кристаллами гидрооксихлорида магния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Haque M.A., Dai J.G., Zhao X.L. Magnesium cements and their carbonation curing : a state-of-the-art review // Low-carbon Materials and Green Construction. 2024. Vol. 2. Issue 1. P. 2. DOI: 10.1007/s44242-023-00033-3. EDN MTEOPG.
2. Dushevina A.M. Study of the strength of caustic dolomite-based materials // Механика и технологии. 2024. № 2 (84). С. 228–237. DOI: 10.55956/GTER6622. EDN HXMMRH.
3. Аверина Г.Ф., Кошелев В.А., Крамар Л.Я. Влияние добавок — регуляторов сроков схватывания на стойкость хлормагнезиальных композитов к растрескиванию при длительном водонасыщении // Строительные материалы. 2024. № 1–2. С. 110–114. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-110-114. EDN CMBXML.
4. Жуков С.В., Чемеков А.М., Черевко С.А., Чистякова Е.А. Магнезиальное вяжущее на основе техногенного сырья // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 95–103. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-95-103. EDN JAEVQZ.
5. Yu W., Yu H., Ma H., Shi T., Wen J., Ma H. Durability of Magnesium Oxychloride Cement in Application: Phase Composition Transition and Microstructure Characteristics // Journal of Materials in Civil Engineering. 2024. Vol. 36. Issue 1. DOI: 10.1061/jmce7. mteng-16643. EDN CBRMDH.
6. An L., Chang Ch., Yan F., Peng J. Study on the Deterioration Mechanism of Magnesium Oxychloride Cement under an Alkaline Environment // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 17. P. 5924. DOI: 10.3390/ma161-75924. EDN DQKYWP.
7. Wang L., Tang Sh. High-performance fiber-reinforced composites: latest advances and prospects // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 1094. DOI: 10.3390/buildings13041094. EDN QQZLCU.
8. Aiken T.A., Kwasny Ja., Russell M., Mcpolin D., Bagnall L. Effect of partial MgO replacement on the properties of magnesium oxychloride cement // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 134. P. 104791. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104791. EDN WNNBCP.
9. Attari N., Amziane S., Chemrouk M. Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 37. Pp. 746–757. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052
10. Soumya S. Strengthening of RC continuous beam using FRP sheet. Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India, 2012.
11. Guo P., Moghaddas S.A., Liu Y., Meng W., Li V.C., Bao Y. Applications of machine learning methods for design and characterization of high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) : a review // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2025. Vol. 14. Issue 9. Pp. 1726–1749. DOI: 10.1080/21650373.2025.2462183
12. Nguyẽn H.H., Nguyẽn Ph.H., Luong Q.Hi. U., Meng W., Lee B.Ye. Mechanical and autogenous healing properties of high-strength and ultra-ductility engineered geopolymers reinforced by PE-PVA hybrid fibers // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 142. P. 105155. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105155. EDN LTFSVQ.
13. He Zh., Han X., Zhang Z., Shi J., Gencel O. Development of a new magnesium oxychloride cement board by recycling of waste wood, rice husk ash and flue gas desulfurization gypsum // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 61. P. 105206. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105206. EDN JHXPV.
14. Yufei H., Xiangming K. Biomimetic organic-inorganic hybrid magnesium oxychloride cement as green adhesive for wood industry // 16th International Conference on Durability of Building Materials and Components. 2023. DOI: 10.23967/c.dbmc.2023.100
15. Liu Ya., Cao Yu., Wang L., Chen Zh.S., Qin Ya. Prediction of the durability of high-performance concrete using an integrated RF-LSSVM model // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 356. P. 129232. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129232. EDN YNYRWQ.
16. He P., Hossain U., Poon C.S., Tsang D.C.W. Mechanical, durability and environmental aspects of magnesium oxychloride cement boards incorporating waste wood // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 207. Pp. 391–399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.015
17. Alghamdi H., Shoukry H., Abdel-Gawwad H.A., Hossain Md.U., Abadel A.A., Eltawil Kh.A. et al. Development of limestone calcined clay cement-based lightweight bricks incorporating waste rockwool: A step into leading the way in low-carbon bricks // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 12. P. 3937. DOI: 10.3390/buildings14123937. EDN WDQADB.
18. Wei L., Wang Y., Yu J., Xiao J., Xu S. Feasibility study of strain hardening magnesium oxychloride cement-based composites // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 165. Pp. 750–760. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.041
19. Wang Y., Wei L., Yu J., Yu K. Mechanical properties of high ductile magnesium oxychloride cement-based composites after water soaking // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 97. Pp. 248–258. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.028
20. Yu K., Guo Y., Zhang Y.X., Soe Kh. Magnesium oxychloride cement-based strain-hardening cementitious composite: Mechanical property and water resistance // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 261. P. 119970. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119970. EDN AFVKKG.
21. Li Ke., Zhang A., Wang Q., Wu B., Liu R., Wang Yu. Et al. Study on the mechanical characteristics

of magnesium oxychloride cement composites reinforced with polyformaldehyde fibers // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 409. P. 134048. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134048. EDN AMTKHU.

22. Ahmad F., Rawat S., Yang R.Ch., Zhang L., Guo Y., Fanna D.J. et al. Effect of hybrid fibres on mechanical behaviour of magnesium oxychloride cement-based composites // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 424. P. 135937. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135937. EDN YAODUE.

23. Rawat S., Saliba P., Estephan P.Ch., Ahmad F., Zhang Y. Mechanical performance of Hybrid Fibre Reinforced Magnesium Oxychloride Cement-based composites at ambient and elevated temperature // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 1. P. 270. DOI: 10.3390/buildings14010270. EDN IMYPBR.

24. Wang L., He T., Liu Z., Su J., Zhou Y., Tang S. et al. The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 282. P. 122706. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122706. EDN HOWGYE.

25. Бикаеева Ю.В., Ибрагимов Р.А., Потапова Л.И., Исламова Г.Г. Фазовый анализ магнезиального камня, модифицированного добавками различной природы // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30. № 4. С. 334–342. EDN IRZLDK.

26. Савельев А.А., Тарасова А.Ю. Роль модифицирующих волокон в формировании структуры цементного камня // Технологии бетонов. 2011. № 11–12. С. 50–51. EDN TKANNT.

27. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 308 с.

28. Пухаренко Ю.В., Пантелейев Д.А., Жаворонков М.И. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19. № 3 (85). С. 436–445. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445. EDN OZZCHD.

29. Pukharenko Yu.V., Khrenov G.M., Klyuev S.V., Khezhev T.A., Eshanzada S.M. Design of steel fiber-reinforced concrete for slip forming // Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7. Issue 5. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-2. EDN IWJVLU.

Поступила в редакцию 20 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 29 октября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Юлия Вячеславовна Бикаева — аспирант; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1045930, Scopus: 57213838597, ORCID: 0000-0003-2382-1023; info@kgasu.ru, uliyaevstigneeva@mail.ru;

Руслан Абдишитович Ибрагимов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии строительного производства; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 619018, Scopus: 56504969400, ResearcherID: O-5968-2017, ORCID: 0000-0001-8879-1190; info@kgasu.ru, rusmag007@yandex.com;

Линур Рафаилевич Гимранов — кандидат технических наук, доцент; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 745548, Scopus: 57210968788, ORCID: 0000-0003-1728-1825; leenuur@gmail.com;

Евгений Валерьевич Королев — доктор технических наук, профессор, проректор по научной деятельности, заведующий кафедрой технологий строительных материалов и метрологии; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 351849 SPIN-код: 1249-6325; Scopus: 37099331400; ResearcherID: K-8134-2013, ORCID: 0000-0003-3600-812X; korolev@nocnt.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Haque M.A., Dai J.G., Zhao X.L. Magnesium cements and their carbonation curing : a state-of-the-art review. *Low-carbon Materials and Green Construction*. 2024; 2(1):2. DOI: 10.1007/s44242-023-00033-3. EDN MTEOPG.
2. Dushevina A.M. Study of the strength of caustic dolomite-based materials. *Mechanics and Technology*. 2024; 2(84):228-237. DOI: 10.55956/GTER6622. EDN HXMMRH.
3. Averina G.F., Koshelev V.A., Kramar L.Ya. The effect of additives regulating the setting time on the resistance of chloromagnesial composites to cracking during prolonged water saturation. *Construction Materials*. 2024; 1-2:110-114. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-110-114. EDN CMBXML. (rus.).
4. Zhukov S.V., Chemekov A.M., Cherevko S.A., Chistjakova E.A. Magnesia cement based on technogenic raw materials. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022;

- 3(92):95-103. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-95-103. EDN JAEVQZ. (rus.).
5. Yu W., Yu H., Ma H., Shi T., Wen J., Ma H. Durability of Magnesium Oxychloride Cement in Application: Phase Composition Transition and Microstructure Characteristics. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2024; 36(1). DOI: 10.1061/jmcee7.mteng-16643. EDN CBRMDH.
6. An L., Chang Ch., Yan F., Peng J. Study on the Deterioration Mechanism of Magnesium Oxychloride Cement under an Alkaline Environment. *Materials*. 2023; 16(17):5924. DOI: 10.3390/ma16175924. EDN DQKYWP.
7. Wang L., Tang Sh. High-performance fiber-reinforced composites: latest advances and prospects. *Buildings*. 2023; 13(4):1094. DOI: 10.3390/buildings1304-1094. EDN QQZLCU.
8. Aiken T.A., Kwasny Ja., Russell M., Mcpolin D., Bagnall L. Effect of partial MgO replacement on the properties of magnesium oxychloride cement. *Cement and Concrete Composites*. 2022; 134:104791. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104791. EDN WNNBCP.
9. Attari N., Amziane S., Chemrouk M. Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2012; 37:746-757. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052
10. Soumya S. *Strengthening of RC continuous beam using FRP sheet*. Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India, 2012.
11. Guo P., Moghaddas S.A., Liu Y., Meng W., Li V.C., Bao Y. Applications of machine learning methods for design and characterization of high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) : a review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2025; 14(9):1726-1749. DOI: 10.1080/21650373.2025.2462183
12. Nguyễn H.H., Nguyễn Ph.H., Luong Q. Hi. U., Meng W., Lee B.Ye. Mechanical and autogenous healing properties of high-strength and ultra-ductility engineered geopolymers reinforced by PE-PVA hybrid fibers. *Cement and Concrete Composites*. 2023; 142:105155. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105155. EDN LTFSVQ.
13. He Zh., Han X., Zhang Yu., Zhang Z., Shi J., Gencel O. Development of a new magnesium oxychloride cement board by recycling of waste wood, rice husk ash and flue gas desulfurization gypsum. *Journal of Building Engineering*. 2022; 61:105206. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105206. EDN JHXPV.
14. Yufei H., Xiangming K. Biomimetic organic-inorganic hybrid magnesium oxychloride cement as green adhesive for wood industry. *16th International Conference on Durability of Building Materials and Components*. 2023. DOI: 10.23967/c.dbmc.2023.100
15. Liu Ya., Cao Yu., Wang L., Chen Zh.S., Qin Ya. Prediction of the durability of high-performance concrete using an integrated RF-LSSVM model. *Construction and Building Materials*. 2022; 356:129232. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129232. EDN YNYRWQ.
16. He P., Hossain U., Poon C.S., Tsang D.C.W. Mechanical, durability and environmental aspects of magnesium oxychloride cement boards incorporating waste wood. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 207:391-399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.015
17. Alghamdi H., Shoukry H., Abdel-Gawwad H.A., Hossain Md.U., Abadel A.A., Eltawil Kh.A. et al. Development of limestone calcined clay cement-based lightweight bricks incorporating waste rockwool: A step into leading the way in low-carbon bricks. *Buildings*. 2024; 14(12):3937. DOI: 10.3390/buildings14123937. EDN WDQADB.
18. Wei L., Wang Y., Yu J., Xiao J., Xu S. Feasibility study of strain hardening magnesium oxychloride cement-based composites. *Construction and Building Materials*. 2018; 165:750-760. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.041
19. Wang Y., Wei L., Yu J., Yu K. Mechanical properties of high ductile magnesium oxychloride cement-based composites after water soaking. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 97:248-258. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.028
20. Yu K., Guo Y., Zhang Y.X., Soe Kh. Magnesium oxychloride cement-based strain-hardening cementitious composite: Mechanical property and water resistance. *Construction and Building Materials*. 2020; 261:119970. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119970. EDN AFVKKG.
21. Li Ke., Zhang A., Wang Q., Wu B., Liu R., Wang Yu. et al. Study on the mechanical characteristics of magnesium oxychloride cement composites reinforced with polyformaldehyde fibers. *Construction and Building Materials*. 2023; 409:134048. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134048. EDN AMTKHU.
22. Ahmad F., Rawat S., Yang R.Ch., Zhang L., Guo Y., Fanna D.J. et al. Effect of hybrid fibres on mechanical behaviour of magnesium oxychloride cement-based composites. *Construction and Building Materials*. 2024; 424:135937. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135937. EDN YAODUE.
23. Rawat S., Saliba P., Estephan P.Ch., Ahmad F., Zhang Y. Mechanical performance of Hybrid Fibre Reinforced Magnesium Oxychloride Cement-based composites at ambient and elevated temperature. *Buildings*. 2024; 14(1):270. DOI: 10.3390/buildings14010270. EDN IMYPBR.
24. Wang L., He T., Liu Z., Su J., Zhou Y., Tang S. et al. The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 282:122706. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122706. EDN HOWGYE.

25. Bikaeva Yu.V., Ibragimov R.A., Potapova L.I., Islamova G.G. Phase analysis of magnesium stone modified by additives of different nature. *Technique and Technology of Silicates*. 2023; 30(4):334-342. EDN IRZLDK. (rus.).
26. Savyelyev A.A., Tarasova A.Yu. The role of modified fibres in the formation of a cement stone the structure. *Concrete Technologies*. 2011; 11-12:50-51. EDN TKANNT. (rus.).
27. Kodakov G.S. *Particle physics*. Moscow, Nauka, 1972; 308. (rus.).
28. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Influence of fiber type and matrix composition on adhesive strength in fiber reinforced concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(3):(85):436-445. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445. EDN OZZCHD. (rus.).
29. Pukharenko Yu.V., Khrenov G.M., Klyuev S.V., Khezhev T.A., Eshanzada S.M. Design of steel fiber-reinforced concrete for slip forming. *Construction Materials and Products*. 2024; 7(5). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-2. EDN IWJVLU.

Received March 20, 2025.

Adopted in revised form on May 23, 2025.

Approved for publication on October 29, 2025.

BIO NOTES: **Yuliya V. Bikaeva** — postgraduate student; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; info@kgasu.ru, ulyaevstigneeva@mail.ru;

Ruslan A. Ibragimov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Production Technology; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; info@kgasu.ru, rusmag007@yandex.com;

Linur R. Gimranov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; leenuur@gmail.com;

Evgenii V. Korolev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Head of the Department of Building Materials Technologies and Metrology; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., 190005, St. Petersburg, Russian Federation; korolev@nocnt.ru.

Contributions of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors claim no conflict of interest.