

## Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида

Оксана Александровна Ларсен<sup>1\*</sup> , Дия Абдулкадим Насер Альобаиди<sup>2</sup> , Светлана Васильевна Самченко<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Российская Федерация

<sup>2</sup> Министерство образования, Главное управление образования в Аль-Кадисии, 58001, Аль-Дивания, улица Альсарай, д. 100, Ирак

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: larsen.oksana@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Широкое применение полимерная фибра получила при производстве конструкционных бетонных элементов, в торкрет-бетонировании туннелей, бетонных перекрытиях, взрывостойком бетоне и жестких дорожных покрытиях. Вопросам применения в дисперсно-армированных бетонах фибры на основе вторичной переработки полимеров в последнее время посвящено множество исследований. Большинство из них затрагивает влияние фибры на прочностные свойства бетона на сжатие, при изгибе и на растяжение. Применяются различные по длине волокна в бетонах на основе нейлона, арамида, полиэстера, полиэтилентерефталата, полипропилена, поливинилового спирта и поливинилхлорида. Однако недостаточное количество данных либо их полное отсутствие о влиянии на свойства бетона с полимерной фиброй на основе переработанного ПВХ вызывает необходимость дополнительных исследований, что особенно актуально ввиду образования значительных объемов отходов ПВХ при производстве пластиковых окон. **Материалы и методы.** В работе применены методы электронной микроскопии и термомеханического анализа для исследования свойств полимерной фибры на основе ПВХ. Для исследования влияния полимерной фибры на свойства мелкозернистых бетонных смесей и затвердевшего бетона применялись стандартные методы исследования, включающие определение диаметра расплыва на встряхивающем столике, среднюю плотность бетонных смесей и бетонов, прочность на растяжение при изгибе и при сжатии. **Результаты исследования.** Методом электронной микроскопии установлено положительное влияние процесса измельчения, позволяющего получить шероховатую поверхность и фибру с длиной 2,5–4 см, шириной 1,75–4 мм и толщиной 0,2–0,3 мм. Установлена принадлежность фибры на основе ПВХ к аморфным полимерам линейного строения с температурой стеклования 86,4 °С и температурой деструкции 208,91 °С. Установлено оптимальное содержание фибры, которое не ухудшает подвижность бетонных смесей и не нарушает их связность и удобообрабатываемость. Показано, что введение фибры на основе ПВХ в состав мелкозернистого бетона в количестве до 1,2% обеспечивает рост плотности бетона в 1,6 раз, повышение прочности при растяжении с изгибом на 22% и не оказывает влияния на прочность при сжатии. **Заключение.** Проведенные исследования подтвердили возможность применения фибры на основе поливинилхлорида в составе мелкозернистых бетонов. Однако недостаточное количество данных о порядке введения для предотвращения ее комкования, совместимости с химическими добавками, вводимыми в бетонную смесь, а также влияния условий твердения и дальнейшей области применения бетонов, в состав которых она входит, вызывает необходимость дальнейшего научного поиска.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** портландцемент, дисперсно-армированный бетон, фибра, рециклинг поливинилхлорида, подвижность, прочность

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Данная работа выполнялась при финансировании Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ларсен О.А., Альобаиди Д., Самченко С.В. Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):254–264. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>. – EDN: WTOZCP.

## Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber

Oksana A. Larsen<sup>1\*</sup> , Dheyaa A. N. Alobaidi<sup>2</sup> , Svetlana V. Samchenko<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

<sup>2</sup> Ministry of Education General Directorate of Al-Qadisiyah Education, Al Diwaniyah, 58001, Al-Diwaniya, Alsaray Street, 100, Iraq

\* Corresponding author: e-mail: larsen.oksana@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Polymer fiber is widely used in the production of structural concrete components, in shotcrete for tunnels, concrete slabs, blast-resistant concrete, and solid road pavements. Recently, numerous studies have been devoted to the use of fibers derived from recycled polymers in fiber-reinforced concrete. Most of these studies address the effect of fiber on the compressive, flexural and tensile strength properties of concrete. Fibers of various lengths based on nylon, aramid, polyester, polyethylene terephthalate, polypropylene, polyvinyl alcohol, and polyvinyl chloride are used in concrete. However, the insufficient amount of data, or its complete absence, regarding the effect on the properties of concrete with polymer fibers based on recycled PVC necessitates further research, which is particularly relevant given the generation of significant volumes of PVC waste during the production of plastic windows. **Materials and methods.** The electron microscopy and thermomechanical analyses (TMA) were used to investigate the properties of PVC-based polymer fibers. The effect of the polymer fiber on properties of fine-grained concrete mixtures and hardened concrete, the standard testing methods were used, including the determination of workability by flow table test diameter on a vibrating plate, the average density of concrete mixtures and concrete, and tensile strength under flexural and compressive loading. **Results.** It is shown the positive effect of the grinding process determined by electron microscopy, which produces a rough surface and fibers of 2.5–4 cm in length, 1.75–4 mm in width, and 0.2–0.3 mm in thickness. It is established that the PVC-based fiber belongs to amorphous polymers of linear structure with a crystallization temperature of 86.4 °C and a destruction temperature of 208.91 °C. It is determined that the optimal fiber content in concrete does not impair the workability of concrete mixtures or affect their cohesion. It is shown that the addition of PVC-based fiber to fine-grained concrete in amount up to 1.2% increases the concrete density of 1.6 times, increases flexural tensile strength by 22%, and has no effect on compressive strength. **Conclusion.** Conducted studies confirm the feasibility of using polyvinyl chloride-based fiber as a component of fine-grained concretes. However, there is the lack of sufficient data of fiber introduction method in concrete which requires additional scientific research to prevent fiber clumping, establish its compatibility with chemical additives added to the concrete mixture and the effect of curing conditions.

**KEYWORDS:** Portland cement, fiber-reinforced concrete, fiber, recycled polyvinyl chloride, workability, strength

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

### FOR CITATION:

Larsen O.A., Alobaidi D., Samchenko S.V. Fine-grained concrete with recycled polyvinyl chloride fiber. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):254–264. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-254-264>. – EDN: WTOZCP.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности бетонов включает не только улучшение их прочностных и эксплуатационных характеристик, но и производство новых композиционных материалов, к которым можно отнести дисперсно-армированные бетоны [1]. Разработка составов фибробетонов с повышенной прочностью, трещиностойкостью и морозостойкостью, водонепроницаемостью, а также стойкостью к истиранию и ударам является наиболее перспективным направлением в области строительного материаловедения. Положительное влияние на свойства бетона оказывают волокна различного происхождения. В качестве фибры могут применяться полимерные, стеклянные,

углеродные, гибридные и растительные волокна различной формы и размеров. Применение металлической фибры получило наибольшее распространение не только в нашей стране, но и за рубежом.

Широкое применение полимерная фибра получила при производстве конструктивных бетонных элементов, в торкрет-бетонировании туннелей, бетонных перекрытиях, взрывостойком бетоне и жестких дорожных покрытиях [2]. В последние годы отдается предпочтение использованию в качестве армирующих волокон вторичных волокнистых материалов из отходов различных отраслей промышленности. Более 90% производимых полимеров по-прежнему изготавливаются из первичных полимеров, только незначительная часть подвергается

переработке [3, 4]. Отмечается [5, 6], что только 32% пластиковых отходов перерабатывается, остальные отходы либо сжигаются (43%), либо выбрасываются на свалку (25%), нанося вред окружающей среде.

Производство пластмасс к настоящему времени достигло огромных масштабов, что также сопутствовало одновременному увеличению количества отходов на их основе. Объем производства пластиковых отходов с 1950 по 2017 год составил 8,3 миллиарда тонн, а в 2021 году он достиг около 400 миллионов тонн в год, и только 9% этого объема было переработано полностью и успешно применялось. По данным [5], объем мирового производства пластмасс в 2023 достиг 413,8 млрд в миллион тонн, из них только 8,9% было отправлено на переработку и только 0,5% использовано для производства изделий.

Срок службы пластмассовых изделий составляет в среднем около 10 лет, а разложение пластмассы длится в течение многих лет, что зависит от состава и способа утилизации [6].

В последние годы повышенный интерес проявляется к изучению влияния полимерной фибры, полученной путем рециклинга, на статические и динамические механические свойства бетона [7], усталостные характеристики [8, 9] и характеристики, связанные с долговечностью. Было обнаружено, что введение переработанного полимерного волокна может уменьшить усадку бетона в раннем возрасте и таким образом повысить механические свойства и долговечность [10]. Наряду с использованием полипропиленовых волокон, введение переработанного полимерного волокна в бетон эффективно предотвращает развитие трещин и повышает устойчивость бетона к замораживанию–оттаиванию [10]. Фибробетон широко используется в качестве материала для дорожного покрытия аэропортов и автомагистралей, настилов мостов, облицовки туннелей и морских платформ [11]. Эти типы изделий подвергаются повторяющимся циклическим нагрузкам в течение всего срока службы. Существует эффективное применение полимерной фибры в бетоне со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками для ремонта и армирования колонн мостов, подверженных воздействию хлоридсодержащих вод. Введение фибры в бетонную смесь значительно уменьшает трещинообразование и ширину раскрытия трещин, которые появляются в результате усадки бетона при его твердении и последующем уходе, что также повышает ударную прочность бетона.

Имеется опыт применения волокон на основе полиэтилентерефталата, полученных из отходов переработки бутылок, применяется фибра и наполнитель на основе полиэтилена, полученного переработкой пакетов низкой и высокой плотности, наполнителей на основе отходов переработки труб из поливинилх-

лорида, а также наполнителя и фибры на основе поливинилхлорида (ПВХ). Также применяется в бетоне фибра, полученная из переработанных электрических кабелей. Имеет место применение различных по длине волокон на основе нейлона [12], арамида [13], полиэстера [14], полиэтилентерефталата [15], полипропилена [16], поливинилового спирта [17], поливинилхлорида [18]. Производство материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ) занимает третье место в мире и составляет примерно 3 млн. тонн [19], что обусловлено высокой химической и атмосферостойкостью, универсальными физико-механическими свойствами в сочетании с низкой стоимостью, разнообразными возможностями переработки, а также возможностью модифицирования свойств и получения широкой номенклатуры материалов [20].

Имеет место применение в дисперсно-армированных бетонах фибры из переработанного поливинилхлорида длиной от 30 до 50 мм и диаметром до 4 мм. Исследование влияния фибры из переработанного ПВХ на технологические и прочностные свойства бетонных смесей и бетонов показало, что введение 1% от массы цемента в бетонную смесь снижает подвижность смеси на 6,67% [21]. Отмечается повышение прочности на сжатие, изгиб и растяжение бетона при введении фибры в количестве 0,6%, 0,8% и 1,0%. Установлено, что введение фибры из переработанного ПВХ в количестве 0,8% приводит к увеличению прочности на сжатие на 30,8%, при изгибе на 9,11%. Установлено, что при увеличении содержания фибры более 0,8% прочность бетона снижается.

По данным [22], введение в бетон волокон на основе переработанного ПВХ длиной 40 мм и толщиной 0,5 мм в количестве 0,5% по объему бетона способствует увеличению на 14,28% прочности на растяжение с изгибом.

Переработка оконных профилей из ПВХ является сложным технологическим процессом. Термическая обработка ПВХ сопровождается выделением хлористого водорода, и это требует соблюдения определенных условий безопасности при работе персонала и получении высокого качества регранулята ПВХ. Переработка профиля включает предварительную обработку, измельчение, сортировку и фракционирование, мойку, экструзию с фильтрацией расплава. Было проведено ограниченное количество исследований о влиянии переработанных волокон на основе различных полимеров.

Вопросам применения в дисперсно-армированных бетонах фибры на основе вторичной переработки полимеров в последнее время посвящено множество исследований. Большинство из них затрагивает влияние фибры на прочностные свойства бетона на сжатие, при изгибе и на растяжение. Однако не-

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

достаточное количество данных либо их полное отсутствие о влиянии на свойства бетона с полимерной фиброй на основе переработанного ПВХ вызывает необходимость дополнительных исследований, что особенно актуально ввиду образования значительных объемов отходов ПВХ при производстве пластиковых окон.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе применялись следующие материалы:

- В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 52,5Н производства АО «Хайдебергцемент Рус» по ГОСТ 31108-2020 «Цементы

общестроительные. Технические условия» с водопотребностью 30,2%; сроками схватывания: нс – 150 мин, кс – 175 мин;  $S_{уд.}$  – 377,3 м<sup>2</sup>/кг, активностью в возрасте 28 суток – 76 МПа. Минералогический и химический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдебергцемент Рус» приведен в таблицах 1 и 2.

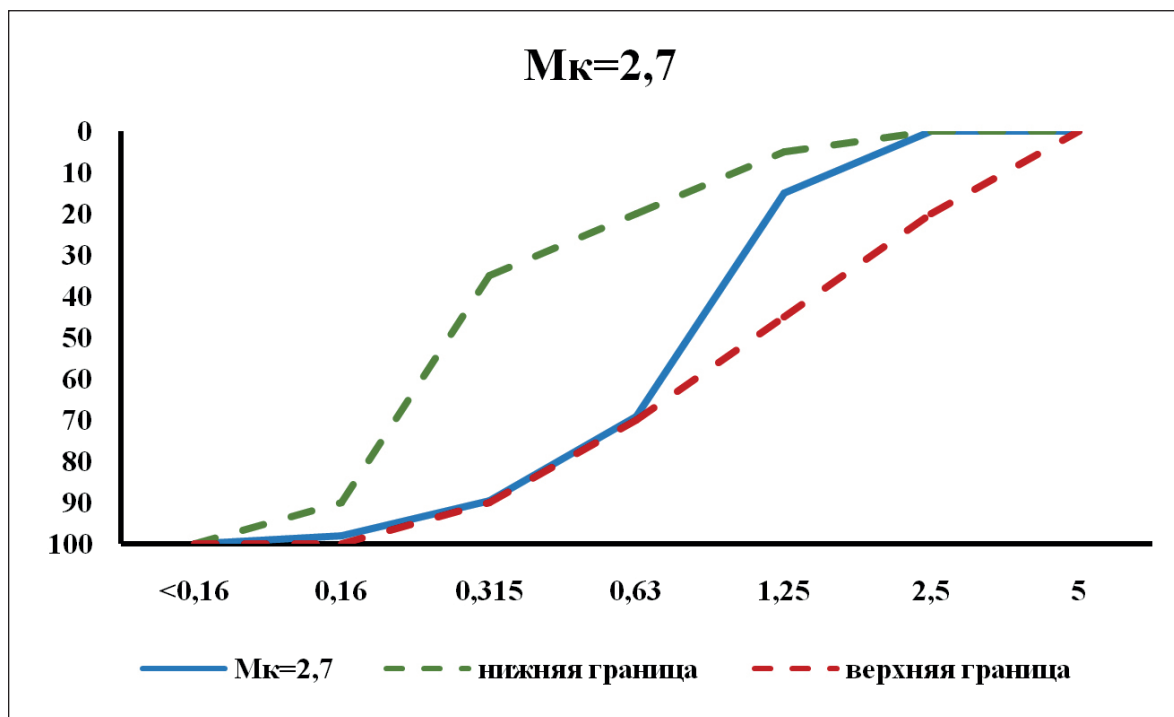
- Кварцевый песок I класса с  $M_k = 2,72$  производства «Боларс» с истинной плотностью 2,65 г/см<sup>3</sup> и гранулометрическим составом приведен на рисунке 1.
- Фибра из переработанного поливинилхлорида, полученная измельчением оконного профиля в рубильной машине с внешним видом, представлена на рисунке 2.

**Таблица 1.** Минералогический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдебергцемент Рус»

Содержание минералов, %			
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
64	14	7	11

**Таблица 2.** Химический состав портландцемента ЦЕМ I 52,5Н «Хайдебергцемент Рус»

Содержание компонентов, %											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.
21,23	4,78	3,31	62,95	1,65	3,22	0,66	0,12	0,08	0,28	0,06	1,60



**Рис. 1.** Гранулометрический состав мелкого заполнителя

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

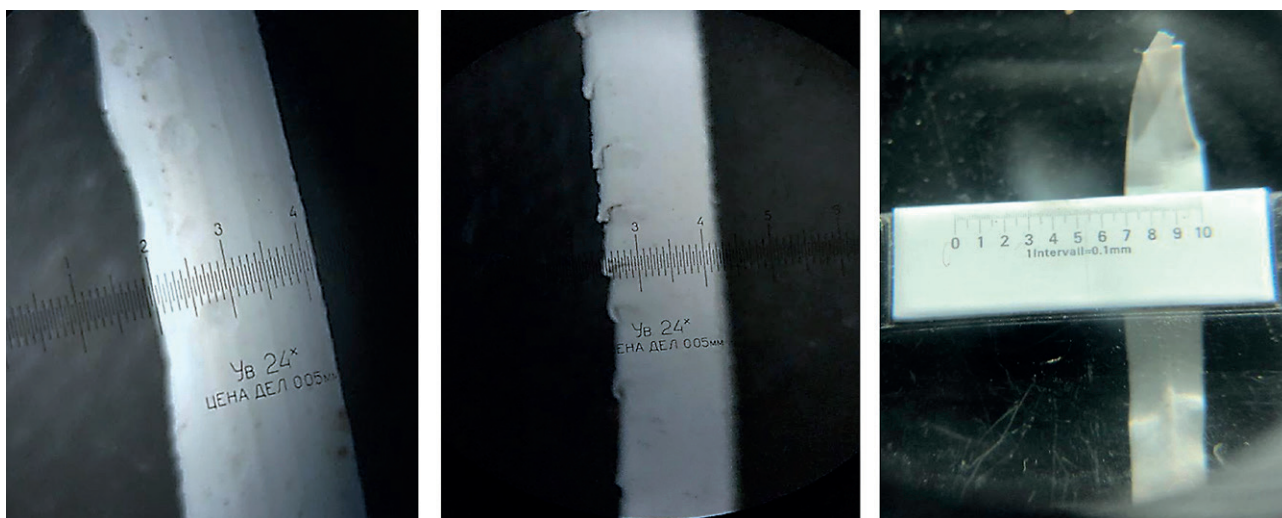


Рис. 2. Внешний вид фибры из переработанного поливинилхлорида

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Технологическая схема представлена на рисунке 3. Получение полимерной фибры на основе переработанных отходов оконного профиля из поливинилхлорида производилось путем измельчения в рубильной машине и включало отделение стеклопакета и уплотнительных резинок от оконного профиля (рис. 4). В случае переработки отходов от раскройки и нарезки оконных рам необходимо удаление защитной пленки с поверхности. Измельчение профиля в рубильной машине в одну стадию позволяет получить полимерную фибру с шероховатой поверхностью длиной от 2,5 до 4 см; шириной от 1,75 до 4 мм и толщиной от 0,2 до 0,3 мм (рис. 5).

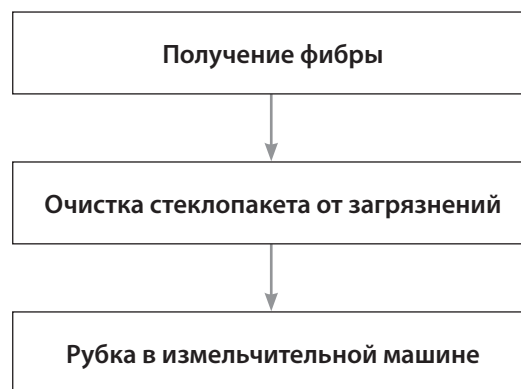


Рис. 3. Получение фибры на основе поливинилхлорида из оконного профиля



Рис. 4. Получение фибры в рубильной машине

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Исследование фазовых и релаксационных состояний свойств фибры на основе поливинилхлорида поливинилхлоридного полимера и определение деформаций при силовом и тепловом воздействии на образец проводилось с помощью оборудования, представленного на рисунке 6. Для определения температур стеклования и деструкции, а также коэффициента линейного термического расширения был использован термомеханический анализатор ТМА Q400 производства «TA Instruments». Образец для испытаний полимера в виде волокна представлен на рисунке 7.

Под термомеханическими свойствами полимеров обычно понимают характеристику механического поведения полимеров под влиянием различных температур [23]. Метод ТМА используется для определения природы полимера, температур кристаллизации, стеклования, плавления, оценки температур-

ных областей работы полимера и т.д. В результате эксперимента было установлено, что полученные данные значительно зависят от условий проведения эксперимента, предварительной обработки, прошедшей при получении поливинилхлоридного профиля, режимов силового и теплового воздействия и т.д. При построении термомеханической кривой нагрузка на образец составила 1 Ньютон, а подъем температуры осуществлялся со скоростью 5 °С. Анализ данных, полученных на основании данных ТМА, показал (рис. 7), что фибра на основе поливинилхлорида относится к аморфным полимерам линейного строения. Анализ кривой на участке 1 при нагревании в интервале температур от 0 до 86,4 °С, соответствующей температуре стеклования, который свидетельствует о том, что полимер относится к аморфным полимерам с линейной структурой (рис. 7) и соответствует стеклообразному состоянию,



Рис. 5. Оборудование для определения геометрических размеров фибры

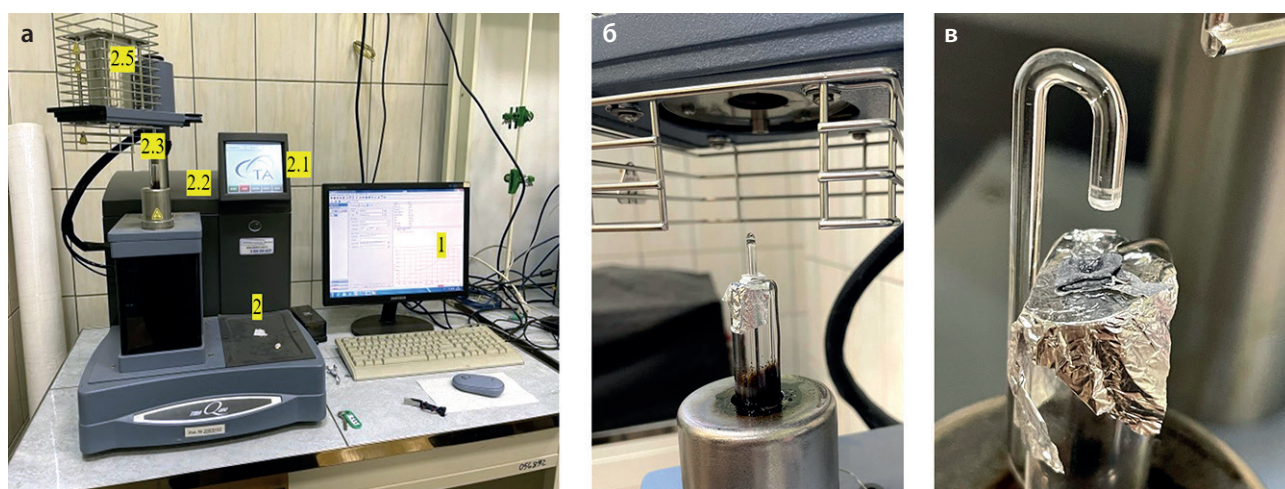
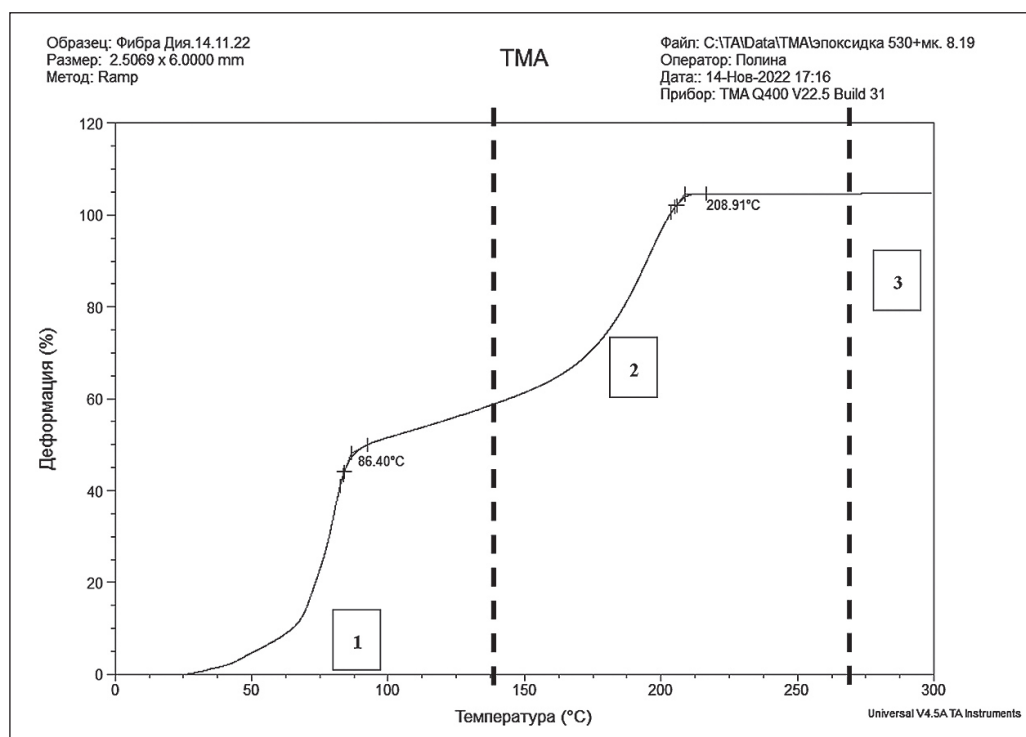


Рис. 6. Исследование термомеханических свойств фибры на основе поливинилхлорида: а) 1 – компьютер; 2 – прибор для ТМА; 2.1 – дисплей; 2.2 – предметный столик; 2.3 – зонд; 2.4 – термора; 2.5 – печь; б) образец фибры до испытания; в) образец после испытания



**Рис. 7.** Исследование термомеханических свойств фибры на основе ПВХ

участок 2 соответствует высокоэластическому состоянию, а участок 3 – вязкотекучему состоянию, соответствующему температуре деструкции 208,91 °С. Для определения КЛТР подъем температуры осуществлялся со скоростью 5 °С и нагрузкой на образец 0,01 Н. Построение термомеханической кривой также позволило установить значение КЛТР на участке от 21,49 до 80,96 °С с шагом 10 °С.

Для улучшения адгезионной прочности между цементной матрицей и фиброй применяются различные способы модификации ее поверхности, к которым можно отнести покрытие полимерами, химическое травление, механическую обработку. Исследование микроструктуры поверхности фибры ПВХ проводилось с помощью растрового электронного микроскопа с автоэмиссионным катодом Quanta 650 FEG. Методом электронной микроскопии установлено, что после измельчения в рубильной машине поверхность фибры изменяется и становится шероховатой (рис. 8).

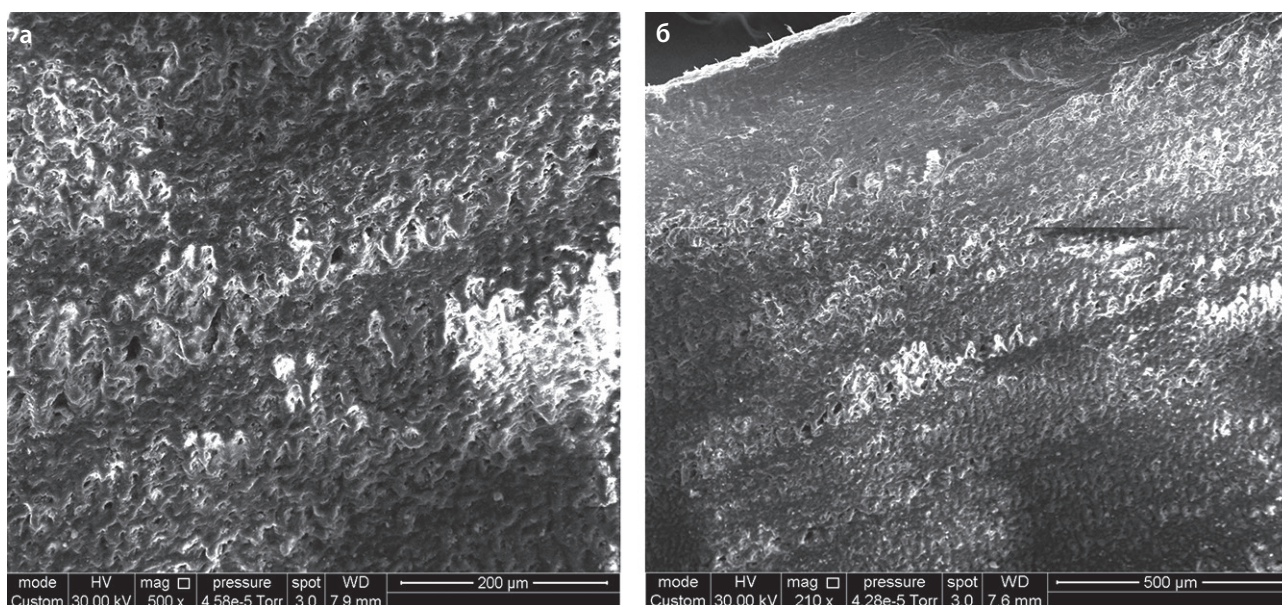
Исследовалось влияние фибры на основе ПВХ на свойства мелкозернистого бетона при ее содержании в количестве от 0 до 3% по массе бетона, составы которого представлены в таблице 3. Приготовление мелкозернистой бетонной смеси проводилось в соответствии с ГОСТ 30744 и заключалось в последовательном смешении сухих компонентов, дальнейшем введении воды затворения и окончательном перемешивании бетонной смеси с введением фибры ПВХ. Время перемешивания составило 3 мин.

Исследование влияния полимерной фибры на основе ПВХ на изменение диаметра расплыва

мелкозернистого бетона с помощью встряхивающего столика показало, что при увеличении количества фибры подвижность мелкозернистого бетона снижается. Минимальное снижение подвижности наблюдалось при содержании фибры от 0,3 до 0,6% и составило 2262–2265 мм. Увеличение содержания фибры до 1,2% привело к значительному снижению подвижности средней плотности бетонной смеси, что можно объяснить высокой водопотребностью фибры и ее развитой поверхностью. Дальнейшее увеличение содержания фибры до 1,8% снижает подвижность с 245 до 143 мм с нарушением связности и удобообрабатываемости смеси, а также снижением средней плотности бетонной смеси до 2247 кг/м<sup>3</sup>, что подтверждается в работах других авторов [24, 25, 26]

Исследовалось влияние ПВХ фибры на прочностные свойства мелкозернистого бетона в возрасте 28 сут. нормального твердения в соответствии с ГОСТ 310.4. Установлено, что при содержании фибры в количестве от 0,4 до 1,2% прочность практически не изменяется и находится в пределах 8,7 МПа, что можно объяснить прочностью, обеспечиваемой цементным вяжущим, что можно объяснить положительным влиянием фибры на процесс структурообразования, которая может выступать в роли центров кристаллизации цементного теста, упорядочивая и уплотняя его структуру [27, 28]. Формирование такой структуры из хаотично распределенных волокон происходит вдоль всей поверхности фибры, обеспечивая улучшение контактной зоны цементного камня улучшенного

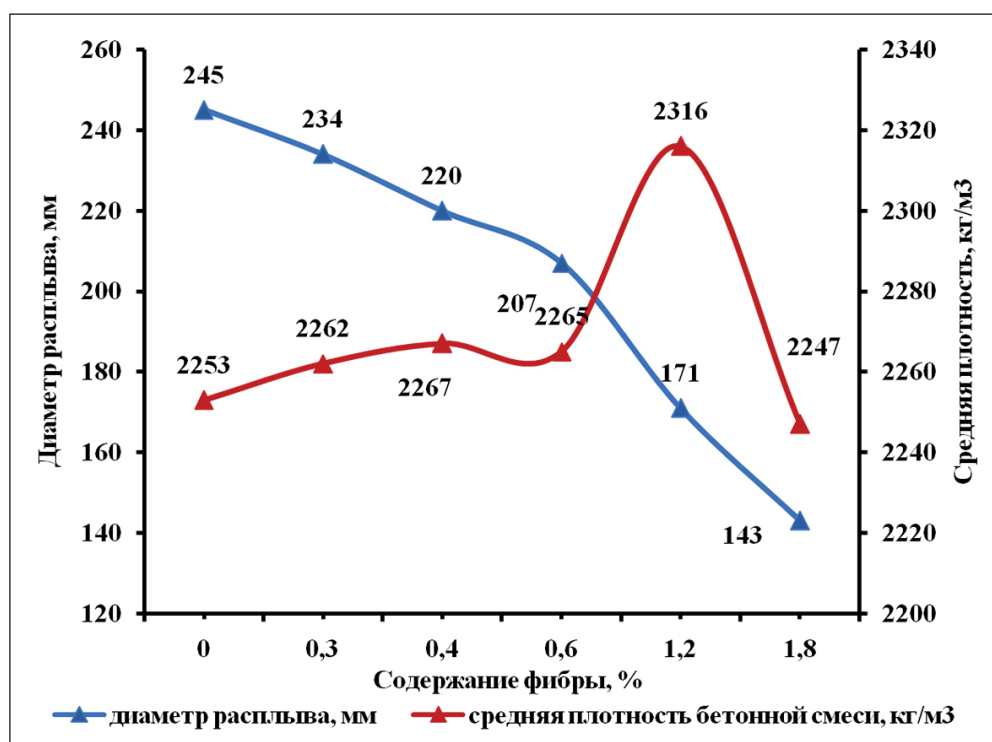
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ



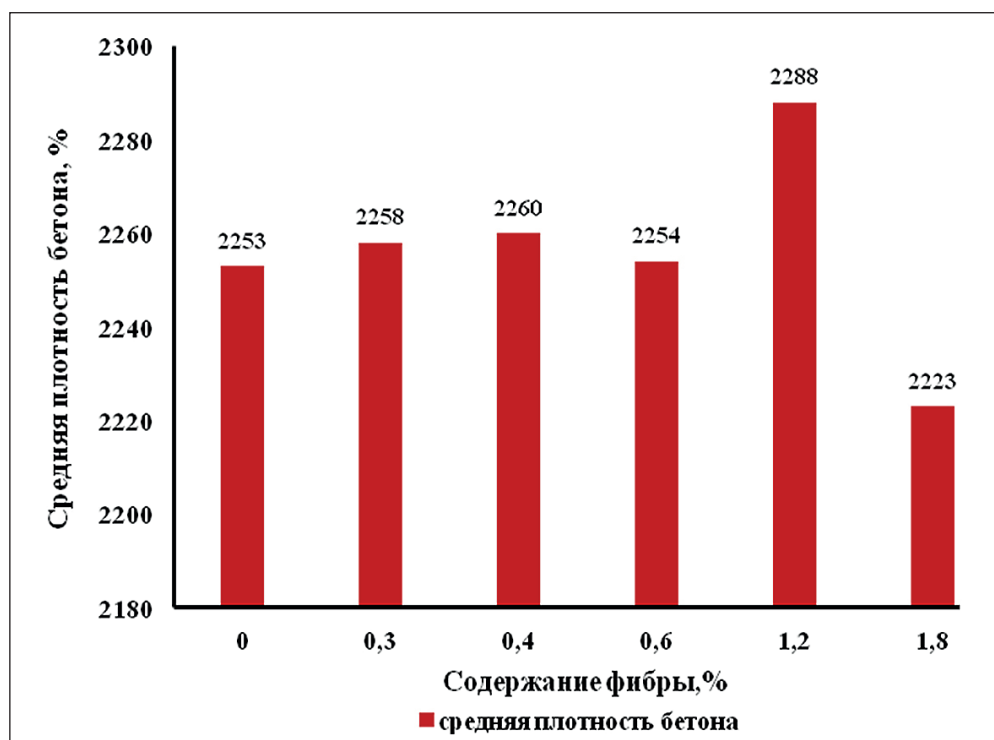
**Рис. 8.** Поверхность фибры из переработанного поливинилхлорида после измельчения: а – увеличение x500; б – увеличение x210

**Таблица 3.** Составы мелкозернистого бетона смесей с различным содержанием фибры на основе ПВХ

Компоненты, г	Содержание фибры, %					
	0	0,3	0,4	0,6	1,2	1,8
Портландцемент	655	655	655	655	655	655
Песок	1310	1310	1310	1310	1310	1310
Фибра	0	5,65	11,0	13,8	27,6	41,4
Вода	295	295	295	295	295	295



**Рис. 9.** Исследование влияния фибры на основе ПВХ на изменение диаметра расплыва мелкозернистого бетона



**Рис. 10.** Исследование влияния полимерной фибры на изменение средней плотности бетона



**Рис. 11.** Исследование влияния ПВХ фибры на прочность при сжатии и на растяжение с изгибом в возрасте 28 сут.

качества, образуется еще и микрокаркас [26]. Увеличение содержания фибры до 1,8% приводит к снижению прочности до 8,3 МПа и снижению средней плотности, что объясняется разупрочнением цементной матрицы и тем, что низко модульная фибра занимает часть площади рабочего сечения в объеме цементного камня, ослабляя его из-за недостатка матричной составляющей и расслоения композита [26].

## ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Установлена возможность применения фибры на основе переработанного поливинилхлорида, способствующая расширению сырьевой базы для производства дисперсно-армированных бетонов,

экономии сырьевых ресурсов, а также уменьшению отрицательного воздействия на окружающую среду и снижению количества отходов на основе поливинилхлорида.

2. Установлено методом электронной микроскопии, что фибра, полученная измельчением ПВХ профилей для изготовления пластиковых окон, имеет шероховатую поверхность длины 2,5–4 см; ширину 1,75–4 мм и толщину 0,2–0,3 мм.

3. Методом термомеханического анализа установлено, что ПВХ фибра относится к аморфным полимерам линейного строения с температурой стеклования 86,4 °С и температурой деструкции 208,91 °С, что обеспечит ее несущую способность в составе дисперсно-армированных бетонов при эксплуатации в условиях повышенных температур.

4. Установлено, что введение ПВХ фибры в количестве от 0,3 до 0,6% не оказывает значительного

влияния на технологические свойства бетонной смеси. Увеличение содержания до 1,8% по массе мелкозернистого бетона приводит к уменьшению подвижности в 1,7 раз, незначительному снижению средней плотности бетонной смеси, нарушению связности и удобообрабатываемости смеси.

5. Установлено, что с увеличением содержания низко модульной ПВХ фибры прочность при сжатии снижается. Введение ПВХ фибры в количестве 1,8% по массе бетона снижает прочность при сжатии в 1,2 раза.

6. Установлено оптимальное содержание ПВХ фибры в составе мелкозернистого бетона, которое находится в пределах 1,2%. Введение фибры в таком количестве обеспечивает увеличение плотности бетона в 1,6 раз, повышение прочности при растяжении с изгибом на 22% и не оказывает влияния на прочность при сжатии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Русанов В.Е., Маслов П.С., Алексеев В.А. Об эффективности применения конструкций из фибробетона в подземном строительстве. Опыт и перспективы. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(3):276–287. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-16-3-276-287>. – EDN: FAEQWR.
2. Пискунов А.А., Луканкин С.А., Петропавловских О.К., Шарипов А.М., Ибрагимова А.А. Физико-механические характеристики композитных материалов на основе полимеров по экспериментальным данным. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):54–67. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-54-67>. – EDN: TPGTYO.
3. Samchenko S.V., Larsen O.A. Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures. *Buildings*. 2023;13,897. <https://doi.org/10.3390/buildings13040897>
4. Aerts S., Corderi Gandara M., Rubens Geudens S., Kuwaba T., De Schrijver I., Vanbroekhoven K., Elst K. Sustainable physical recycling of rigid PVC waste: A biobased solvent approach for the recovery of PVC, TiO<sub>2</sub>, and CaCO<sub>3</sub>. *Waste Management*. 2025;202,114798. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114798>
5. PlasticsEurope, 2024, Plastics-The facts 2024. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/> (Accessed on January 2024).
6. Любешкина Е. Г. *Вторичное использование полимерных материалов*. М.: Химия, 1985.195 с.
7. Zaid O., Kahla N.B. Natural fiber reinforcements in cement-based composites: A review on recent advances, properties, and sustainability. *Industrial Crops and Products*. 2026;240,122520. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122520>
8. Cengiz O., Turanli L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:1357–1364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.024>
9. Hosseinzadeh H., Salehi A. M., Mehraein M., Asadollahfardi G. The effects of steel, polypropylene, and high-performance macropolypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2023;386:131589 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>
10. Meena A., Surendranath A., Ramana P.V. Assessment of mechanical properties and workability for polyethylene terephthalate fiber reinforced concrete. *Materials today. Proceedings*. 2022;50:2307–2314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.054>
11. Dong C., Zhang Q., Chen C., Jiang T., Guo Z., Liu Y., Lin S. Fresh and hardened properties of recycled plastic fiber reinforced self-compacting concrete made with recycled concrete aggregate and fly ash, slag, silica fume. *Journal Building Engineering*. 2022; 62:105384. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105384>
12. Qureshi H.J., Ahmad J., Garcia-Troncoso N. Review on characteristics of concrete reinforced with nylon fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2023;8(1):1-15. <https://doi.org/10.1177/15589250231189812>
13. Talikoti R. S., Kandekar S. B. Strength and durability study of concrete structures using aramid-fiber-reinforced polymer. *Fibers*. 2019;7(2):1-11. <https://doi.org/10.3390/fib7020011>
14. Hiremath P., Yaragal S. C. Performance of polypropylene and polyester fibres-reinforced reactive powder concretes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2023;373,130862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130862>
15. Meza de Luna A., Uddin A. S. F. Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2020;265,120331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>

16. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона. *Техника и технология силикатов*. 2024;31(3):247–261. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>. – EDN: AYFQSM
17. Wang J., Dong H. PVA fiber-reinforced ultrafine fly ash concrete: Engineering properties, resistance to chloride ion penetration, and microstructure. *Journal of Building Engineering*. 2023;66,105858. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105858>
18. Islam T., Safiuddin M., Roman R.A., Chakma B., Al Maroof A. Mechanical Properties of PVC Fiber-Reinforced Concrete – Effects of Fiber Content and Length. *Buildings*. 2023;13,2666. <https://doi.org/10.3390/buildings13102666>
19. Renkin C., Limbourg S. Sustainable Reverse Supply Chain Optimization: A Case Study in PVC Recycling. *IFAC-PapersOnLine*. 2025; 59(10),1772–1777. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.298>
20. Titow W.V. *PVC plastics: properties, processing and applications*. Elsevier applies science, London and New York; 1990.
21. Stichnothe H., Azapagica A. Life cycle assessment of recycling PVC window frames. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;71:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.005>
22. Setiawan A.A., Philip F.J., Permanasari E. Mechanical properties of waste plastic banner fiber reinforced concrete. *Journal of Technology*. 2018;80:113–119. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.11365>
23. Teitelbaum B.Ya. *Thermomechanical Analysis of Polymers*. Moscow: Nauka, 1979. (In Russ.)
24. Bhogayata A.C., Arora N.K. Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Construction and Building Materials*. 2017;146:455–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.095>
25. Adda H.M., Slimane M. Study of concretes reinforced by plastic fibers based on local materials. *International journal Engineering Research of Africa*. 2019;42:100–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.42.100>
26. Пухаренко Ю.В., Кострикин М.П. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию. *Строительство и реконструкция*. 2020;(2):96–106. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-96-106>. – EDN: HIMESM
27. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(2):110–116. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116>. – EDN: NEIHAU
28. Коваленко Ю.Ф., Шулаева Е.А., Шулаев Н.С. Применение поливинилхлорида для нанокompозитов (анализ и оптимизация показателей качества). *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(6): 519–530. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-519-530>. – EDN: WRQEQL

#### 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

**Ларсен Оксана Александровна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, larsen.oksana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9612-7190>

**Альобаиди Дия Абдулкадим Насер** – кандидат технических наук, преподаватель, Министерство образования, Главное управление образования в Аль-Кадисии, 58001, Аль-Дивания, улица Альсарай, д. 100, Ирак, dheyaa.alobaidi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-1724-4903>

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

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Ларсен О.А.** – научное руководство; разработка методики; написание проекта статьи; участие в разработке программы исследований и ее реализации; концепция исследования; заключительные выводы.

**Альобаиди Дия Абдулкадим Насер** – участие в разработке программы исследований и её реализации, доработка текста.

**Самченко С.В.** – научное руководство; разработка методики; написание проекта статьи; участие в разработке программы исследований и ее реализации; концепция исследования; заключительные выводы.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 06.04.2026; принята к публикации 12.04.2026.