



МРНТИ 67.09.33

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-23-40>

Применение легкого фибробетона для изготовления шахтных затяжек

Ю.В.Пухаренко* , Д.А.Пантелеев , М.И.Жаворонков 

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E mail: tsmm@spbgasu.ru

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения фиброкерамзитобетона в качестве материала для изготовления шахтных затяжек. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения прочности, трещиностойкости и долговечности крепей в подземных горных выработках. Целью исследования является разработка облегчённого бетона на пористом заполнителе с дисперсным армированием, обладающего оптимальными физико-механическими характеристиками для работы в шахтных условиях. В работе приведён сравнительный анализ традиционных и легких бетонных смесей, обоснован выбор керамзита в качестве заполнителя и фиброволокон для повышения прочности на растяжение при изгибе. Методология включает лабораторные испытания на прочность, плотность и водопоглощение различных составов. Основные результаты показали, что введение фибры позволяет значительно повысить трещиностойкость и прочность затяжек без увеличения массы конструкции. Исследование подтвердило целесообразность применения фиброкерамзитобетона для обеспечения эффективной и экономичной крепи в шахтных условиях. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения полученных составов в строительные процессы горнодобывающей промышленности с целью увеличения срока службы конструкций и повышения безопасности работ.

Ключевые слова: фибробетон, керамзитобетон, шахтные затяжки, легкий бетон, дисперсное армирование, трещиностойкость, подземные выработки.

Поступила 28.06.2025. Доработана 10.07.2025. Одобрена 09.09.2025. Доступна онлайн 30.09.2025

* автор для корреспонденции

Введение

Шахтная затяжка представляет собой элемент крепи горных выработок в виде прямоугольной железобетонной плиты длиной до 1000 мм, шириной до 250 мм и толщиной до 50 мм (рис. 1).

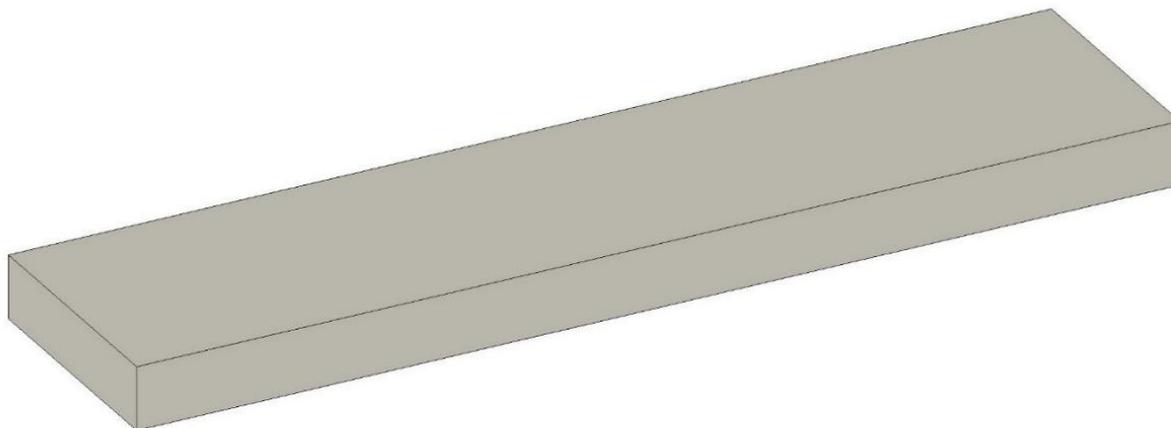


Рисунок 1. Шахтная затяжка

Несмотря на широкое применение, их использование сопряжено с рядом существенных недостатков, которые могут снижать эффективность и надежность горных работ. Одной из ключевых проблем является значительный вес конструкций, что усложняет транспортировку и монтаж затяжек, особенно в труднодоступных условиях подземных выработок. Кроме того, традиционные материалы, используемые для изготовления затяжек, часто характеризуются низкой трещиностойкостью и вязкостью разрушения, что увеличивает риск их повреждения [1, 2]. Для решения этих проблем современные исследования предлагают инновационные подходы, включая использование композиционных материалов, таких как фибробетон, в том числе и легкий, например, фиброкерамзитобетон [3, 4].

Этот материал обладает уникальными свойствами, позволяющими существенно снизить вес конструкции за счет пористой структуры керамзита, одновременно увеличивая механическую прочность благодаря дисперсному армированию волокнами [5, 6]. Фиброкерамзитобетон также демонстрирует повышенную трещиностойкость и способность противостоять динамическим нагрузкам, что делает его перспективным решением для улучшения характеристик шахтных затяжек [7, 8].

В последние годы проведен значительный объем исследований и получены подробные сведения о трещиностойкости дисперсно-армированных бетонов, матрицей которых является тяжелый бетон [9, 10]. Гораздо меньше информации по данному вопросу поступает относительно фиброармированных легких бетонов [11].

Таким образом исследование свойств лёгких фибробетонов представляет собой актуальную научную и инженерную задачу, поскольку позволяет получить строительный материал, сочетающий в себе высокие прочностные характеристики, легкость и

устойчивость к внешним воздействиям. Это открывает возможности для его широкого применения в современном строительстве.

Методология

В работе применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» [12]; кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,4$ по ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [13]; керамзитовый песок с насыпной плотностью 305 кг/м³ (марка по насыпной плотности М350) по ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия» [14]; пластификатор «СИНТЕФЛОУ» Мега 52 на основе поликарбоксилатного эфира в соответствии с ТУ 2216-008-78722668–2015 «Гиперпластификатор *Sinteflow*».

В качестве дисперсной арматуры в работе использовалась:

- Синтетическая макрофибра «*Concrix ES*» (рис. 2, а) по ТУ 2272-002-22885424–2013 «Полимерные волокна (фибры) "Конкриск" на основе для армирования различных поверхностей» длиной 50 мм, эквивалентным диаметром 0,5 мм, модулем упругости 11000 МПа.
- Стальная фрезерная фибра (рис. 2, б) длиной 36 мм, эквивалентным диаметром 0,6 мм, модулем упругости 210000 МПа.
- Стальная проволочная фибра (рис. 2, в) производства «Белорусского металлургического завода» по ТУ 14-1-5564–2008 «Фибра из стальной проволоки для дисперсного армирования бетона. Технические условия» длиной 22 мм, диаметром 0,3 мм, модулем упругости 210000 МПа.



Рисунок 2. Синтетическая макрофибра «*Concrix ES*» (а), стальная фрезерная фибра (б), стальная проволочная фибра (в)

Подбор состава керамзитобетонной матрицы осуществлялся с целью получения материала с оптимальным сочетанием прочностных и технологических характеристик, пригодного для применения в конструкциях с пониженной плотностью и повышенной трещиностойкостью.

При разработке состава учитывались следующие требования:

- осадка конуса – марка по подвижности П2.
- предел прочности при сжатии – не менее 25 МПа;

- средняя плотность – не выше 1700 кг/м³.

Для изготовления керамзитобетонных образцов использовалась легкобетонная смесь с соотношением портландцемента к кварцевому песку, равным 1:2. Для регулирования (уменьшения) средней плотности бетона, часть кварцевого песка заменялась керамзитовым. Водоцементное отношение подбиралось с учетом нормальной густоты портландцемента, водопотребности керамзитового и кварцевого песка, а также их фактического расхода. Составы смесей после корректировки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Составы керамзитобетонных смесей, кг/м³

Сырьевые материалы	Номер состава				
	1	2	3	4	5
Портландцемент	406	437	454	487	504
Кварцевый песок	812	842	908	975	1008
Керамзитовый песок	162	155	148	139	131
Вода	187	201	209	223	231
Пластифицирующая добавка	2,03	2,19	2,27	2,44	2,52

Процесс приготовления керамзитобетонных и фиброкерамзитобетонных смесей осуществлялся в лабораторном бетоносмесителе принудительного действия. Сначала загружались все сухие компоненты и перемешивались в течение 60 с. Далее добавлялась вода, содержащая дозированную часть суперпластификатора, и перемешивание продолжалось ещё на протяжении 120 с. Фибра в количестве 0,5 об. % и 1,0 об. % вводилась на последнем этапе, после чего процесс перемешивания продолжался до обеспечения равномерного распределения волокон по всему объему керамзитобетонной смеси. Для контроля прочности при сжатии изготавливались образцы-кубы размером 10x10x10 см, для контроля прочности на растяжение при изгибе и характеристик трещиностойкости – образцы-балки размером 7x7x28 см, для контроля ударной вязкости – образцы размером 2x10x40 см.

Процесс уплотнения смесей осуществлялся при помощи стандартной лабораторной виброплощадки. После чего свежееотформованные образцы помещались в камеру нормального твердения, в которой выдерживались 28 суток до начала испытаний. Определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости керамзитобетона и фиброкерамзитобетона производились в соответствии с требованиями ГОСТ 29167–2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [15]. Подробное описание обработки полученных результатов опубликовано в предыдущих работах [16, 17]. Испытание по определению ударной вязкости проводилось на устройстве, позволяющем грузам (ударникам) известной массы (m) свободно падать с определенной высоты (h). В ходе испытания фиксировалось количество ударов (n), необходимое для появления первой трещины и для полного разрушения образца.

Коэффициент ударной вязкости (μ) вычисляются по формуле (1):

$$\mu = E_{\text{разр}}/E_{\text{тр}} \quad (1)$$

где, $E_{тр}$ – энергия, необходимая для появления первой трещины; $E_{разр}$ – энергия, необходимая для полного разрушения.

Энергию (E) вычисляют по формуле (2):

$$E = n \cdot (m \cdot g \cdot h) \quad (2)$$

где, m – масса ударника, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – высота падения груза (ударника), м; n – количество ударов.

Ударную вязкость ($R_{уд}$) вычисляют по формуле (3):

$$R_{уд} = \frac{E_{разр}}{b \times t} \quad (3)$$

где, b – ширина образца, измеренная вблизи линии излома, м; t – толщина образца, измеренная по линии излома, м.

Результаты и Обсуждение

В возрасте 28 суток образцы высушивались до постоянной массы, взвешивались и подвергались испытанию по определению предела прочности при сжатии. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Полученные результаты средней плотности и предела прочности при сжатии керамзитобетон

Характеристики керамзитобетона	Номер состава				
	1	2	3	4	5
Средняя плотность, кг/м ³	1462	1527	1614	1722	1768
Марка по средней плотности	D1500	D1600	D1700	D1800	D1800
Предел прочности при сжатии, МПа	18,2	20,5	26,2	29,1	32,8

По результатам испытаний оптимальным признан состав №3, с показателями предела прочности при сжатии 26,2 МПа и средней плотности 1614 кг/м³. Данный состав использовался как базовый для фиброкерамзитобетон.

На рисунке 3 представлены диаграммы деформирования керамзитобетонных и фиброкерамзитобетонных образцов, полученных в ходе проведения эксперимента.

Предел прочности на растяжение при изгибе неармированных керамзитобетонных образцов составил 3,6 МПа. При армировании стальной проволоочной фиброй предел прочности на растяжение при изгибе составил: при 0,5 об. % – 7,13 МПа (+98 % по сравнению с неармированным образцом); 1,0 об. % – 9,98 МПа (+177 % по сравнению с неармированным образцом). При армировании стальной фрезерной фиброй предел прочности на растяжение при изгибе составил: 0,5 об. % – 6,8 МПа (+89 % по сравнению с неармированным образцом); 1,0 об. % – 10,07 МПа (+180 % по сравнению с неармированным образцом).

При армировании синтетическими макроволокнами в количестве 0,5 об. % предел прочности на растяжение при изгибе составил 5,19 МПа, что превышает прочность неармированного керамзитобетона на 44 %. Увеличение содержания волокон до 1,0 об. %, привело к росту прочности до 8,06 МПа (+124 % по сравнению с неармированным образцом).

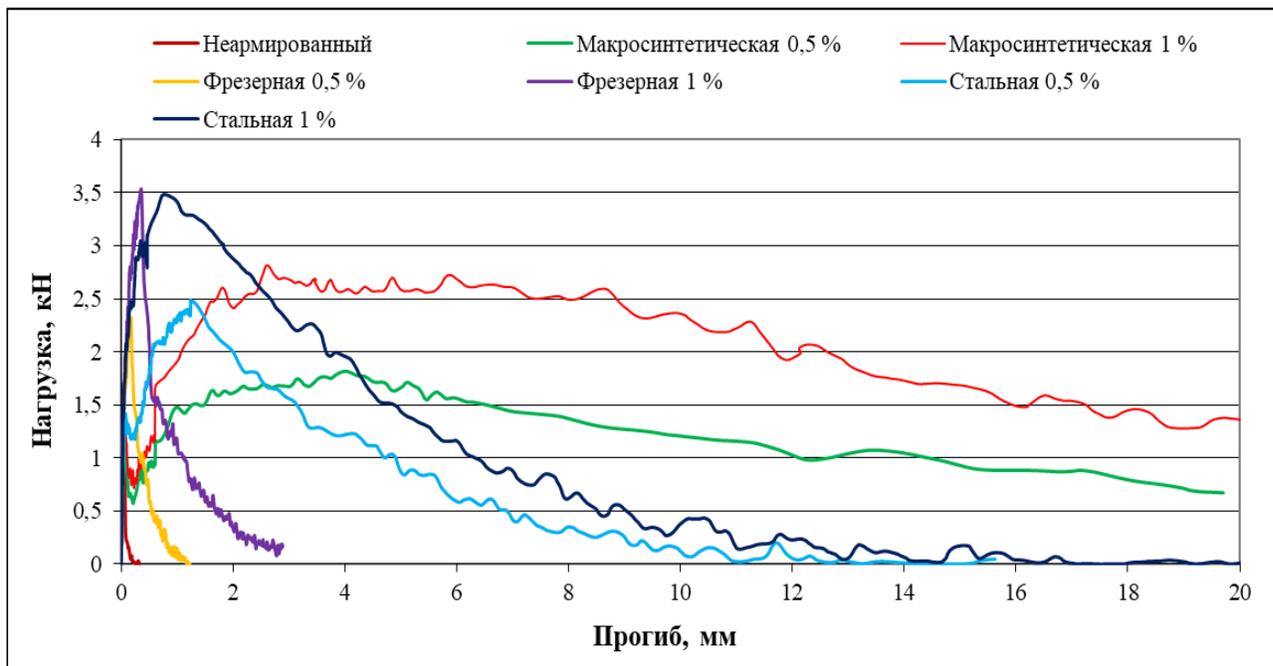


Рисунок 3. Диаграммы деформирования фиброцементаобразцов

Все три типа фибры обеспечивают повышение прочности с увеличением объёмного содержания армирующих волокон от 0 до 1,0 %. При этом стальная проволочная и фрезерная фибра обеспечивает наивысшие численные значения прочности при изгибе на всех стадиях армирования. Это объясняется высоким модулем упругости стали, который значительно превышает модуль упругости керамзитобетонной матрицы.

Синтетическая макрофибра демонстрирует менее выраженный рост прочности, однако обеспечивает лучшее распределение напряжений при больших прогибах, что особенно ценно при циклических и ударных нагрузках.

При сравнении поведения образцов, армированных стальной фрезерной фиброй, можно отметить, что увеличение содержания фибры с 0,5 % до 1,0 % приводит к значительному увеличению пикового значения нагрузки – с 2,4 кН до 3,6 кН. Однако при этом форма диаграммы не претерпевает качественных изменений: в обоих случаях после достижения максимума наблюдается резкое снижение деформационной кривой, что свидетельствует о хрупком разрушении. Это указывает на то, что даже при удвоении количества фрезерной фибры её влияние ограничивается увеличением начального сопротивления, но не способствует существенному повышению вязкости разрушения.

Таким образом, её работа ограничена до момента начала раскрытия трещины, после чего волокна теряют способность эффективно перераспределять напряжения.

В то же время образцы, армированные стальной проволочной фиброй, демонстрируют иное поведение. При содержании 0,5 % максимальная нагрузка составляет около 2,6 кН – выше, чем у фрезерной фибры того же содержания. Более того, кривая имеет плавный наклон после точки максимума, указывающий на наличие остаточной прочности и устойчивого сопротивления разрушению.

Полученные после обработки диаграмм деформирования силовые и энергетические характеристики трещиностойкости керамзитобетона и фиброкерамзитобетона, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости

Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фиброкерамзитобетона	Вид и содержание фибры						
	неармированный бетон	синтетическая макрофибра (0,5 об. %)	синтетическая макрофибра (1,0 об. %)	стальная проволочная (0,5 об. %)	стальная проволочная (1,0 об. %)	стальная фрезерная (0,5 об. %)	стальная фрезерная (1,0 об. %)
Средняя плотность, кг/м ³	1582	1612	1631	1626	1689	1636	1689
Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, G_i , Дж/м ²	12,2	16,6	17,8	23,6	23,2	25,3	25,3
Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, G_f , Дж/м ²	20,9	7636	15606	3379	6169	252	899
Критический коэффициент интенсивности напряжений, K_c , МПа·м ^{0,5}	0,48	0,58	0,60	0,65	0,69	0,70	0,74
J -интеграл, Дж/м ²	7,63	11,20	12,77	18,29	22,78	18,90	20,98
Модуль упругости, E , МПа	20131	20336	20529	22958	24929	23108	24852
Предел прочности на растяжение при изгибе, $R_{изг}$, МПа	3,60	5,19	8,06	7,13	9,98	6,80	10,07

При увеличении содержания проволочной фибры до 1,0 % пиковая нагрузка возрастает до 3,5 кН, то есть не столь резко, как у фрезерной фибры, однако при этом характер разрушения становится ещё более вязким. Кривая демонстрирует длительное удержание нагрузки даже при значительном прогибе, достигающем 10 мм. Это говорит о высокой способности проволочной фибры сопротивляться раскрытию трещин и поддерживать работоспособность конструкции на стадии постпикового разрушения.

На рисунке 4 представлена диаграмма деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной фиброй двух типов – проволочной и фрезерной.

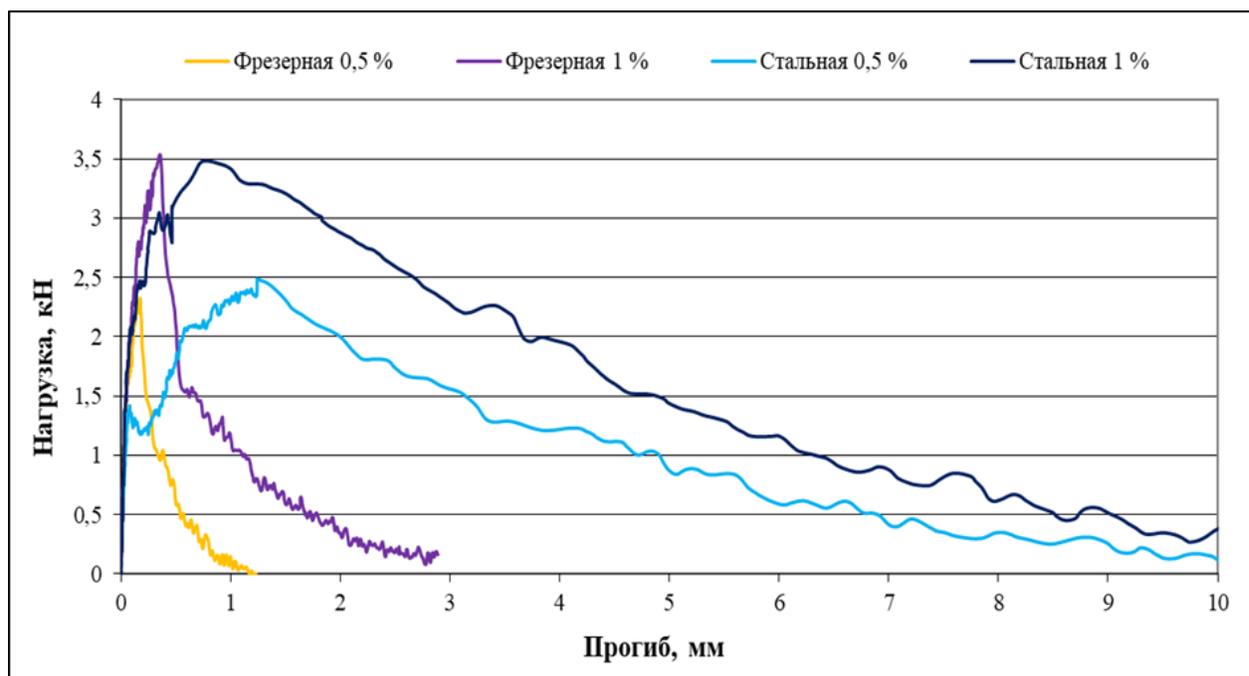


Рисунок 4. Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной фрезерной и проволочной фиброй

Сравнивая оба типа фибры при одном и том же содержании, видно, что фрезерная обеспечивает лишь рост максимальной прочности, но не предотвращает хрупкое разрушение, тогда как проволочная фибра формирует вязкий и устойчивый процесс разрушения с длительным удержанием остаточной несущей способности. Это делает её более предпочтительной для конструкций, подверженных циклическим или ударным нагрузкам, где важна не только прочность, но и способность материала сохранять целостность после начала трещинообразования.

Таким образом, увеличение процентного содержания фибры оказывает положительное влияние на прочность, но степень этого влияния зависит от типа волокон. На основании представленных диаграмм оптимальным выбором для армирования лёгкого фибробетона с точки зрения комплексных характеристик – прочности и сопротивления разрушению – является применение 1,0 % стальной проволочной фибры, которая обеспечивает надёжную работу конструкции даже в условиях раскрытия и развития трещин.

На рисунке 5 представлена диаграмма деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной проволочной и синтетической макрофиброй. Армирование керамзитобетона синтетической макрофиброй в количестве 0,5 об. %, обеспечивает максимальную нагрузку в 1,8 кН с последующим относительно плавным снижением. Прогиб достигает 20 мм, и кривая сохраняет устойчивую форму с невысокой, но стабильной остаточной несущей способностью. Поведение материала можно охарактеризовать как вязкое, без признаков хрупкого разрушения, однако максимальная прочность сравнительно невысока

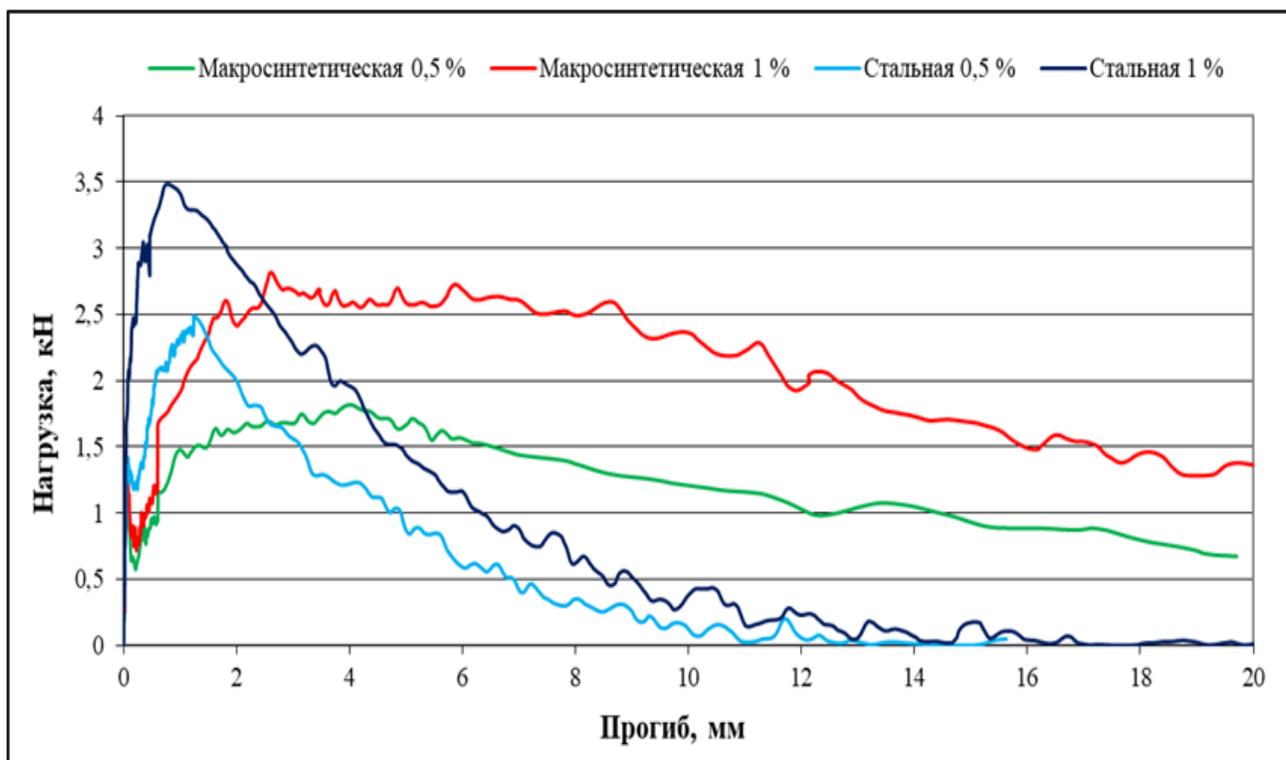


Рисунок 5. Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной проволочной и синтетической макрофиброй

При увеличении содержания синтетической макрофибры до 1,0 об. % наблюдается значительное повышение прочности: максимальная нагрузка достигает 2,7 кН. Главное отличие – появление устойчивой горизонтальной части на кривой после достижения пика, что указывает на активную работу волокон в постпиковой стадии. Прогиб также превышает 20 мм, а линия демонстрирует умеренное снижение несущей способности с увеличением деформаций. Таким образом, повышение содержания синтетических макроволокон, улучшает как прочность, так и способность материала сохранять целостность после начала трещинообразования.

Для сравнения: стальная проволочная фибра при содержании равном 0,5 об. % демонстрирует пиковую нагрузку 2,6 кН, однако сразу после пика происходит быстрое снижение сопротивления. Несмотря на это, остаточная прочность сохраняется на уровне, близком к бетону на макросинтетике с 0,5 об. %, при меньшем прогибе – около 10 мм. При

увеличении содержания проволочной фибры до 1,0 % пиковая нагрузка возрастает до 3,5 кН. Однако при прогибе равном 6–8 мм наблюдается существенное снижение несущей способности. Максимальный прогиб – менее 10 мм. Таким образом, проволочная фибра обеспечивает высокую начальную прочность, но характеризуется ограниченной вязкостью по сравнению с синтетической макрофиброй.

Сравнивая оба вида армирования, можно сделать вывод, что проволочная фибра эффективнее в увеличении прочности на ранних стадиях нагружения и трещиностойкости (критический коэффициент интенсивности напряжений керамзитобетона, армированного стальной фиброй, больше, чем фиброкерамзитобетона с использованием синтетической макрофибры), особенно при содержании 1,0 об. %, но после возникновения магистральной трещины она быстро теряет несущую способность. В то же время синтетическая макрофибра обеспечивает более стабильную и длительную работу при больших прогибах. Это делает её более подходящей для конструкций, где важна способность материала сопротивляться деформациям и сохранять целостность после появления трещин.

Анализ графиков, иллюстрирующих зависимость нагрузки от прогиба при изгибе образцов лёгкого фибробетона, позволяет сделать обоснованные выводы о характере работы и эффективности различных видов дисперсного армирования:

- Стальная проволочная фибра обеспечивает наиболее высокую прочность на пике нагружения, что говорит о высокой несущей способности материала. Однако характер разрушения носит относительно хрупкий характер (в сравнении с керамзитобетоном, армированным синтетической макрофиброй) – после достижения максимума диаграмма резко снижается и предельный прогиб составляет 10 мм. Это указывает на то, что проволочная фибра лучше работает в конструкциях, где важна высокая начальная прочность, но не требуется значительная деформативность после трещинообразования.
- Стальная фрезерная фибра также показывает высокий уровень пиковых нагрузок, сравнимый или даже превышающий проволочную фибру. Однако её характер разрушения ещё более хрупкий – кривая резко обрывается после пика, что свидетельствует о низкой вязкости разрушения и отсутствии остаточной несущей способности. Следовательно, фрезерная фибра эффективна только на стадии предварительного разрушения, но не обеспечивает работу материала после раскрытия трещин.
- Синтетическая макрофибра, напротив, проявляет наилучшую вязкость разрушения и устойчивость в постпиковой стадии. Предельный прогиб достигает 20 мм. Это делает её оптимальной для конструкций, подверженных длительному воздействию нагрузок, ударов или циклических деформаций, где важно не столько предотвратить трещинообразование, сколько обеспечить безопасное и контролируемое разрушение конструкции.

Таким образом, выбор оптимального типа фибры зависит от условий эксплуатации конструкции: при необходимости обеспечения высокой начальной прочности целесообразно использовать высокомодульную стальную фибру, а при необходимости повышенной деформативности и вязкости разрушения – синтетическую макрофибру, обеспечивающую надёжную работу композита в постпиковой стадии.

В ходе испытания по определению ударной вязкости фиксировалось количество ударов (n), необходимое для появления первой трещины ($E_{тр}$) (рис. 6, а) и для полного разрушения образца ($E_{разр}$) (рис. 6, б).

Ударная вязкость характеризует способность материала поглощать энергию при динамическом нагружении и является важным параметром при оценке трещиностойкости и вязкости разрушения бетона.

Согласно полученным результатам, ударная вязкость неармированного керамзитобетона составляет 1051 Дж/м^2 , что свидетельствует о низкой способности материала к поглощению энергии при динамическом или ударном нагружении.

Синтетическая макрофибра демонстрирует наибольшую эффективность в аспекте роста ударной вязкости. Характер роста показателя почти линейный. Это указывает на высокую способность синтетических макроволокон поглощать энергию при раскрытии и развитии трещин, благодаря их значительной деформативности и хорошему сцеплению с цементной матрицей.

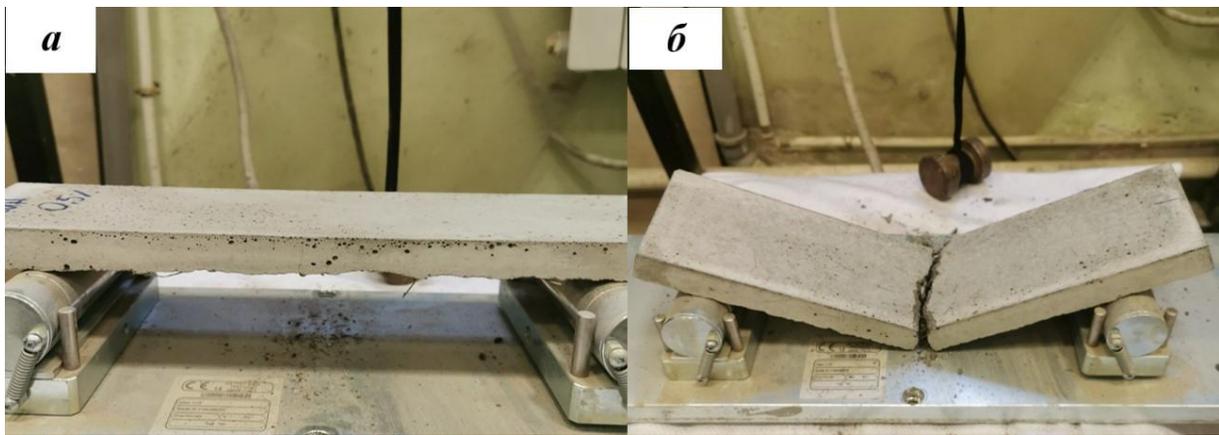


Рисунок 6. Процесс испытания ударной вязкости: а – появление первой трещины на испытуемом образце; б – полное разрушение испытуемого образца

Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты испытания ударной вязкости

Вид и содержание фибры, %	Ударная энергия (первая трещина), $E_{тр}$, Дж	Ударная энергия (разрушение образца), $E_{разр}$, Дж	Ударная вязкость, $R_{уд}$, Дж/м ²	Коэффициент ударной вязкости, μ
неармированный керамзитобетон	0,74	1,48	1057	2
стальная проволочная (0,5 %)	14,72	29,44	21029	2
стальная проволочная (1,0 %)	19,62	41,69	29779	2,125
стальная фрезерная (0,5 %)	5,89	7,36	5257	1,25

стальная фрезерная (1,0 %)	8,83	11,04	7886	1,25
синтетическая макрофибра (0,5 %)	4,91	49,10	35071	10
синтетическая макрофибра (1,0 %)	9,81	83,39	59564	8,5

Проволочная стальная фибра обеспечивает умеренное повышение ударной вязкости. Несмотря на меньшие значения по сравнению с синтетической макрофиброй, данный тип армирования способствует повышению прочности при изгибе в большей мере, а также к сопротивлению разрушению на упругой стадии (трещиностойкость).

Фрезерная стальная фибра показывает наименьший прирост ударной вязкости. Это может быть обусловлено укороченной длиной волокон и их ограниченной способностью к анкерованию в бетонной матрице при динамическом воздействии. Синтетическая макрофибра, несмотря на низкий модуль упругости, обладает значительным запасом энергии деформации и хорошо работает в условиях раскрытия трещин за счёт высокой растяжимости. Это позволяет ей эффективно тормозить процесс разрушения при динамических воздействиях, обеспечивая значительный прирост ударной вязкости. Проволочная стальная фибра демонстрирует сбалансированные свойства: умеренный уровень ударной вязкости сочетается с высокой несущей способностью и прочностью на растяжение при изгибе. Фрезерная фибра в силу своей структуры более эффективна в условиях статического нагружения, чем при ударных воздействиях.

Таким образом, наибольший эффект в плане повышения ударной вязкости лёгкого бетона достигается при использовании синтетической макрофибры в количестве 1,0 об. %, что делает её предпочтительной в конструкциях, эксплуатируемых в условиях динамического или ударного нагружения. Проволочная стальная фибра – оптимальный вариант, когда требуется сочетание трещиностойкости, вязкости разрушения и высокой несущей способности. Фрезерная фибра может использоваться в системах, где критична статическая прочность, однако её эффективность в ударных условиях ограничена.

Заключение

В результате проведенных исследований получены новые экспериментальные данные, доказывающие эффективность использования дисперсно-армированного керамзитобетона для изготовления шахтных затяжек.

Исследованы физико-механические характеристики дисперсно-армированного керамзитобетона с использованием различных видов волокон. Установлено, что: Стальная проволочная фибра при объёмном содержании, равном 1,0 %, обеспечивает наивысшие значения как начальной прочности, так и некоторых деформативных и энергетических характеристик:

- максимальный прирост модуля упругости;
- высокая ударная энергия до образования первой трещины ($E_{тр} \approx 20$ Дж);
- значительные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины ($G_i \approx 23$ Дж/м²) и удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение ($G_f = 6200$ Дж/м²).

Это делает данный тип фибры оптимальным для конструкций, эксплуатируемых в условиях динамических, ударных и вибрационных нагрузок, где критична способность материала к сдерживанию и торможению развития трещин.

Стальная фрезерная фибра также демонстрирует высокую эффективность при содержании 1,0 %, уступая проволоочной лишь по показателям вязкости разрушения – удельным эффективным энергозатратам на статическое разрушение (G_f) и ударной вязкости ($R_{уд}$). Её применение целесообразно в конструкциях, где требуется высокая прочность, устойчивость к усадочным деформациям и надёжность при сохранении технологичности укладки бетонной смеси.

Синтетическая макрофибра, несмотря на низкий модуль упругости, способствует повышению вязкости разрушения, устойчивости материала к распространению трещин при больших деформациях и ударной вязкости. Такая фибра может эффективно использоваться в конструкциях, где основное требование – это равномерное распределение деформаций, безопасность разрушения и долговечность в агрессивных средах (например, в элементах, при необходимости защиты от коррозии или в условиях повышенной влажности).

Исходя из этого, выбор оптимального типа и содержания фибры должен осуществляться в зависимости от условий работы подземной конструкции в целом и конкретных требований к шахтным затяжкам.

Вклад авторов

Ю.В. Пухаренко — разработка концепции исследования, общее руководство работой.

Д.А. Пантелеев — проведение экспериментов, сбор и обработка исходных данных.

М.И. Жаворонков — анализ полученных данных, участие в написании и редактировании текста статьи.

Список литературы

1. Семенюк С.Д., Кетнер Э.А. Прочность и деформативность керамзитобетонов на основе сырья заводов Республики Беларусь // Проблемы современного бетона и железобетона. 2017. № 9. С. 414–435.
2. Семенюк С.Д., Ржевуцкая В.А. Влияние компонентов легкого бетона на прочностные и деформативные характеристики // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4 (61). С. 102–109.
3. Раупов Ч.С. Керамзитобетон для транспортного строительства: монография / Ташкент: Tamaddun, 2020. – 356 с.
4. T.M. Ismael, S.D. Mohammed Structural performance of fiber-reinforced lightweight concrete slabs with expanded clay aggregate // Materialstoday: proceedings. Volume 42, Part 5, 2021, Pp. 2901–2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.746>
5. Zhiyi Tang, Xiongjun He, Yinda Fu, Haoyu Li, Weiwei Wu, Jianxin Lu, Chi Sun Poon Flexural bearing capacity of lightweight concrete beams reinforced by end-hooked steel fibers // Construction and Building Materials Volume 472, 18 April 2025, 140826. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140826>

6. Qiao Liao, Shen-Yi Lu, Jian-Xin Lu, Chi Sun Poon Improving mechanical and fracture properties of high-performance lightweight concrete by using steel fiber and sustainable high-strength core-shell lightweight aggregate // Construction and Building Materials Volume 459, 17 January 2025, 139697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139697>
7. Москалькова Ю.Г., Ржевуцкая В.А. Полипропиленовая фибра как фактор снижения полных усадочных деформаций керамзитобетона // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 1 (73). С. 11–23. DOI 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001
8. Afshar Seydmoradi, Mohammad Hadi Tavana, Mohammad Reza Habibi Investigation on the response of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete slab under sequential impact loading // Engineering Failure Analysis Volume 161, July 2024, 108221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108221>
9. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости // Вестник СибАДИ. 2022, Т. 19, № 5 (87). С. 752–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
10. Матус Е.П., Пичугин А.П. Трещиностойкость сталефибробетона с малым процентом армирования // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 11–12 (683–684). С. 85–90.
11. Jinwang Mao, Ninghui Liang, Xinrong Liu, Zuliang Zhong, Chuanhua Zhou Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests // Journal of Building Engineering Volume 70, 1 July 2023, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106155>
12. ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
13. ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2019. – 8 с.
14. ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
15. ГОСТ 29167–2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». – М.: Стандартинформ, 2022. – 16 с.
16. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностойкости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137.
17. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода исследования поведения сталефибробетона под нагрузкой при изгибе // Экономика строительства. 2024. № 9. С. 168–171.

Ю.В. Пухаренко*, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков

Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті

Шахта тіректерін дайындауда жеңіл фибробетонды қолдану

Аңдатпа. Мақалада шахта тіректерін дайындау материалы ретінде фиброкерамзитобетонды қолдану мүмкіндігі қарастырылады. Тақырыптың өзектілігі жер астындағы тау-кен қазбаларындағы тіректердің беріктігін, жарықшаға төзімділігін және ұзақ мерзімділігін арттыру қажеттілігімен айқындалады. Зерттеудің мақсаты – дисперсті арматураланған кеуекті толтырғыш негізінде шахталық жағдайда жұмыс істеуге қолайлы оңтайлы физика-механикалық сипаттамалары бар жеңіл бетон әзірлеу. Жұмыста дәстүрлі және жеңіл бетон қоспаларының салыстырмалы талдауы жүргізіліп, толтырғыш ретінде керамзитті және иілу кезіндегі созылу беріктігін арттыру үшін фиброталшықтарды таңдаудың негіздемесі берілген. Әдістеме әртүрлі құрамдардың беріктігіне, тығыздығына және су сіңіргіштігіне жүргізілген зертханалық сынақтарды қамтиды. Негізгі нәтижелер фибра енгізу арқылы тіректердің жарықшаға төзімділігі мен беріктігін құрылым салмағын арттырмай едәуір жоғарылатуға болатынын көрсетті. Зерттеу нәтижелері шахталық жағдайларда тиімді және үнемді тіректерді қамтамасыз ету үшін фиброкерамзитобетонды қолданудың орынды екенін растады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы – алынған құрамдарды тау-кен өнеркәсібіндегі құрылыс процесіне енгізу арқылы құрылымдардың қызмет ету мерзімін ұзарту және жұмыстардың қауіпсіздігін арттыру мүмкіндігі болып табылады.

Түйін сөздер: фибробетон, керамзитобетон, шахта тіректері, жеңіл бетон, дисперсті арматуралау, жарықшаға төзімділік, жер асты қазбалары

Yu.V. Pukharenko*, D.A. Pantelev, M.I. Zhavoronkov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Application of Lightweight Fiber-Reinforced Concrete for Shaft Lagging

Abstract. The article examines the possibility of using fiber-reinforced expanded clay concrete as a material for shaft lagging. The relevance of the topic is determined by the need to increase the strength, crack resistance, and durability of supports in underground mine workings. The aim of the study is to develop lightweight concrete on a porous aggregate with dispersed reinforcement, possessing optimal physical and mechanical properties for operation under mining conditions. The paper presents a comparative analysis of traditional and lightweight concrete mixes, justifies the choice of expanded clay as an aggregate, and fiber reinforcement for improving tensile strength in bending. The methodology includes laboratory tests of various compositions for strength, density, and water absorption. The main results showed that the introduction of fibers significantly improves crack resistance and strength of lagging without increasing the weight of the structure. The study confirmed the feasibility of using fiber-reinforced expanded clay concrete to ensure efficient and cost-effective support in mining conditions. The practical significance of the work lies in the possibility of introducing the developed compositions into the construction processes of the mining industry in order to extend the service life of structures and improve work safety.

Keywords: fiber concrete, expanded clay concrete, shaft lagging, lightweight concrete, dispersed reinforcement, crack resistance, underground workings

References

1. Semenyuk S.D., Ketner E.A. Prochnost' i deformativnost' keramzitobetonov na osnove syr'ya zavodov Respubliki Belarus' // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. 2017. № 9. Pp. 414–435
2. Semenyuk S.D., Rzhhevutskaya V.A. Vliyanie komponentov legkogo betona na prochnostnye i deformativnye kharakteristiki // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. 2018. № 4 (61). Pp. 102–109
3. Raurov Ch.S. Keramzitobeton dlya transportnogo stroitel'stva: monografiya / Tashkent: Tamaddun, 2020. – 356 p.
4. T.M. Ismael, S.D. Mohammed Structural performance of fiber-reinforced lightweight concrete slabs with expanded clay aggregate // Materials Today: Proceedings. Volume 42, Part 5, 2021, Pp. 2901–2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.746>
5. Zhiyi Tang, Xiongjun He, Yinda Fu, Haoyu Li, Weiwei Wu, Jianxin Lu, Chi Sun Poon Flexural bearing capacity of lightweight concrete beams reinforced by end-hooked steel fibers // Construction and Building Materials Volume 472, 18 April 2025, 140826. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140826>
6. Qiao Liao, Shen-Yi Lu, Jian-Xin Lu, Chi Sun Poon Improving mechanical and fracture properties of high-performance lightweight concrete by using steel fiber and sustainable high-strength core-shell lightweight aggregate // Construction and Building Materials Volume 459, 17 January 2025, 139697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139697>
7. Moskal'kova Yu.G., Rzhhevutskaya V.A. Polipropilenovaya fibra kak faktor snizheniya polnykh usadochnykh deformatsiy keramzitobetona // Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury. 2024. No. 1 (73). Pp. 11–23. DOI 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001
8. Afshar Seydmoradi, Mohammad Hadi Tavana, Mohammad Reza Habibi Investigation on the response of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete slab under sequential impact loading // Engineering Failure Analysis Volume 161, July 2024, 108221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108221>
9. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Otsenka effektivnosti dispersnogo armirovaniya betonov po pokazatelyam prochnosti i treshchinostoykosti // Vestnik SibADI. 2022, Vol. 19, No. 5 (87). Pp. 752–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
10. Matus E.P., Pichugin A.P. Treshchinostoykost' stalefibrobetona s malym protsentom armirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2015. No. 11–12 (683–684). Pp. 85–90.
11. Jinwang Mao, Ninghui Liang, Xinrong Liu, Zuliang Zhong, Chuanhua Zhou Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests // Journal of Building Engineering Volume 70, 1 July 2023, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106155>
12. GOST 31108–2020 «Tsementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya». – Moscow: Standartinform, 2020. – 16 p.
13. GOST 8736–2014 «Pesok dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya». – Moscow: Standartinform, 2019. – 8 p.
14. GOST 32496–2013 «Zapolniteli poristye dlya legkikh betonov. Tekhnicheskie usloviya». – Moscow: Standartinform, 2019. – 12 p.

15. GOST 29167–2021 «Betony. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhenii». – Moscow: Standartinform, 2022. – 16 p.
16. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Razvitie metoda ispytaniya treshchinostoykosti stalefibrobetona // Ekonomika stroitel'stva. 2023. No. 9. Pp. 132–137.
17. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Razvitie metoda issledovaniya povedeniya stalefibrobetona pod nagruzkoy pri izgibe // Ekonomika stroitel'stva. 2024. No. 9. Pp. 168–171.

Сведения об авторах

Пухаренко Юрий Владимирович- доктор технических наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия), профессор, профессор-консультант кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., д.4, 190005, г. Санкт-Петербург, РФ.

Пантелеев Дмитрий Андреевич- кандидат технических наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия), доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., д.4, 190005, г. Санкт-Петербург, РФ.

Жаворонков Михаил Ильич- кандидат технических наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия), доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., д.4, 190005, г. Санкт-Петербург, РФ.

Пухаренко Юрий Владимирович – техникалық ғылымдар докторы (05.23.05 – Құрылыс материалдары мен бұйымдары), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университетінің Құрылыс материалдары технологиясы және метрология кафедрасының профессор-кеңесшісі, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., 2-Қызыләскерлік к-сі, 4 үй, 190005.

Пантелеев Дмитрий Андреевич – техникалық ғылымдар кандидаты (05.23.05 – Құрылыс материалдары мен бұйымдары), доцент, Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университетінің Құрылыс материалдары технологиясы және метрология кафедрасының доценті, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., 2-Қызыләскерлік к-сі, 4 үй, 190005.

Жаворонков Михаил Ильич – техникалық ғылымдар кандидаты (05.23.05 – Құрылыс материалдары мен бұйымдары), доцент, Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университетінің Құрылыс материалдары технологиясы және метрология кафедрасының доценті, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., 2-Қызыләскерлік к-сі, 4 үй, 190005.

Yuriy Vladimirovich Pukharenko – Doctor of Technical Sciences (05.23.05 – Building Materials and Products), Professor, Consulting Professor at the Department of Building Materials Technology and Metrology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, 190005, Saint Petersburg, Russian Federation.

Dmitry Andreevich Panteleev – Candidate of Technical Sciences (05.23.05 – Building Materials and Products), Associate Professor at the Department of Building Materials Technology and Metrology,

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, 190005, Saint Petersburg, Russian Federation.

Mikhail Ilyich Zhavoronkov – Candidate of Technical Sciences (05.23.05 – Building Materials and Products), Associate Professor at the Department of Building Materials Technology and Metrology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, 190005, Saint Petersburg, Russian Federation.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).