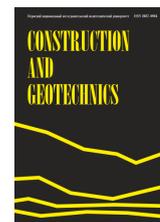




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 2, 2024

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.04

УДК 691.3

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЕГКОГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ

А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 20 октября 2023
Одобрена: 24 апреля 2024
Принята к публикации:
03 июня 2024

Ключевые слова:

легкий бетон, стальные волокна, нанокремнезем, прочность, модуль упругости, температурные режимы.

АННОТАЦИЯ

Легкий бетон сравнительно недавно заинтересовал исследователей в качестве альтернативного конструкционного материала при возведении зданий и сооружений. Благодаря своему малому собственному весу и несложным процессам изменения структуры он сильно заинтересовал заказчиков и оказался весьма востребованным в строительстве. Многокомпонентный состав такого бетона постоянно совершенствуется и приводит к получению высококачественных образцов. Особое внимание уделяется сопротивляемости легкого бетона к действию высоких температур и повышению пожарной безопасности. Перспективным направлением в области исследований является определение прочностных характеристик в случае изменения структурных компонентов при различных температурных режимах. Цель работы состояла в проведении эксперимента на образцах с применением стальных волокон и нанокремнезема. В рамках исследований выявлены физические процессы реакции легкого бетона и общие закономерности разрушения испытанных образцов. Показано позитивное влияние нанокремнезема на микроструктуру бетона, что позволило повысить прочность на сжатие и модуль упругости материала. По итогам исследований установлено, что только ограниченное содержание стальных волокон приводит к снижению уровня распространения трещин и улучшает характеристики бетона при растяжении. Изменение состава путем комплексного включения добавок при различных температурных режимах привело к улучшению механических свойств образцов. Легкий бетон получил дополнительный ресурс прочности, который может быть использован в строительных конструкциях при сильных тепловых воздействиях при возникновении пожара. Результаты исследований имеют прикладной характер и ориентированы на разработку комплексной методологии повышения прочностных характеристик легкого бетона как конструкционного материала зданий и сооружений в условиях высоких температур.

© Сиянов Александр Ильич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.
Ярошевич Данил Константинович – студент, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.

Alexander I. Siyanov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.
Danil K. Yaroshevich – Student, e-mail: vntusiyarov@gmail.com.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

STUDIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE STRENGTH AT DIFFERENT TEMPERATURE REGIMES

A.I. Siyanov, D.K. Yaroshevich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 October 2023
Approved: 24 April 2024
Accepted for publication:
03 June 2024

Keywords:

lightweight concrete, steel fibers, nano-silica, strength, modulus of elasticity, temperature conditions.

ABSTRACT

Lightweight concrete has recently interested researchers as an alternative structural material in the construction of buildings and structures. Due to its small own weight and a simple process of changing the structure, it was very interesting to customers and proved to be very popular in construction. The multicomponent composition of such concrete is constantly being improved and leads to the production of high-quality samples. Special attention is paid to the resistance of lightweight concrete to high temperatures and increased fire safety. A promising direction in the field of research is the determination of strength characteristics in the case of changes in structural components under different temperature conditions. The aim of the work was to conduct an experiment on samples using steel fibers and nano-silica. As part of the study, the processes of physical reactions of light concrete and general patterns of destruction of the tested samples were identified. The positive effect of nano-silica on the microstructure of concrete has been shown, which made it possible to increase the compressive strength and elastic modulus of the material. According to the research results, it was found that only a limited content of steel fibers leads to a decrease in the level of crack propagation and improves the tensile properties of concrete. Changing the composition by the complex inclusion of additives at different temperature conditions led to an improvement in the mechanical properties of the samples. Lightweight concrete has received an additional strength resource, which can be used in building structures under strong thermal influences in the event of a fire-hazardous situation. The research results are applied in nature and are aimed at developing a comprehensive methodology for improving the strength characteristics of lightweight concrete as a structural material of buildings and structures at high temperatures.

Введение

В настоящее время среди потенциальных заказчиков наблюдается заметный интерес к разработкам в области возведения зданий и сооружений с применением новых типов легких бетонов. Исследователи, в свою очередь, занимаются вопросами изменения качественного состава, улучшения физико-механических свойств и получения различных модификаций таких материалов. Из опыта проектирования известно, что многие проблемы при возведении крупных объектов связаны в первую очередь со значительными нагрузками от собственного веса, особенно если речь идет о тяжелых высотных зданиях и массивных большепролетных мостах. Проведенный обзор литературных источников позволил выявить приоритетные направления в области исследований и разработки новых материалов [1]. Особое внимание уделяется вопросам сопротивляемости действия высоких температур и повышения пожарной безопасности [2]. Известно, что бетон сохраняет свою структуру до температуры 200 °С, после чего возможно снижение его прочности. Значительно улучшить физико-механические свойства можно путем разработки нового состава или благодаря изменению структурных компонентов. Как правило, повышение прочности бетона достигается его армированием. Возможно применение стальных, полимерных или некоторых других волокон. В литературе [3] широко представлены исследования свойств армированного бетона с включением стали. Тем не менее работы по ис-

пользованию стальных волокон в бетоне показывают различные результаты. Так, по итогам экспериментов установлено, что введение стального волокна в состав легкого бетона до 1,5 % приводит к росту прочности на сжатие в пределах от 5 до 25 % [4, 5]. В других статьях [6, 7] отмечено слабое влияние стального волокна на прочность. По результатам проведенных комплексных экспериментов выявлено снижение прочности бетона при прямом действии огня [8]. Некоторые авторы считают, что стальные волокна могут даже снизить хрупкость бетона и повысить его пластичность [9]. В основу таких утверждений положены проведенные исследования по объемному содержанию армирующих элементов. В нашем исследовании важно обеспечить механические свойства и защиту от воздействия высоких температур. Поэтому использование только стального волокна является недостаточным и требует включения дополнительных компонентов.

Из результатов исследований влияния высоких температур известно, что свойства бетона ухудшаются в результате процесса разложения компонентов. Тогда имеет смысл изменить состав материала. Одним из элементов, который может быть введен в бетон и использован для исследований, является нанокремнезем (nano-SiO_2) [10, 11]. Такой материал легко позволяет создать специальный гель и уплотнить цементную матрицу [12]. Как свидетельствуют проведенные эксперименты [13], постепенное добавление нанокремнезема от нуля до 4 % приводит к росту прочности и улучшению тепловых свойств бетона. Подобные закономерности отмечаются и в работе других исследователей [14]. Кроме того, продуктивными оказались результаты воздействия на бетон с нанокремнеземом высоких температур [15]. Таким образом, для повышения свойств материала при силовых и тепловых воздействиях предложено включить два элемента: стальное волокно и нанокремнезем.

Материалы и методы

В качестве легкого заполнителя использован керамзит с размером зерен до 12 мм. Песок принят на основе оксида кремния с максимальным размером 4,5 мм. Их параметры и свойства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры и свойства заполнителей

Table 1

Parameters and properties of fillers

Тип материала	Максимальный размер, мм	Насыпная плотность, кг/м^3	Водопоглощение, %
Керамзит	12	700	6,8
Песок	4,5	2650	1,2

Для изготовления образцов выбран портландцемент ЦЕМ II. Эффективная укладка обеспечена суперпластификатором на основе карбоксилатов в пропорции 0,7 % от массы цемента. Кроме того, в состав бетона вводился нанокремнезем с размером частиц 13...15 нм и стальное волокно с концевыми загибами длиной 50 мм (рис. 1).

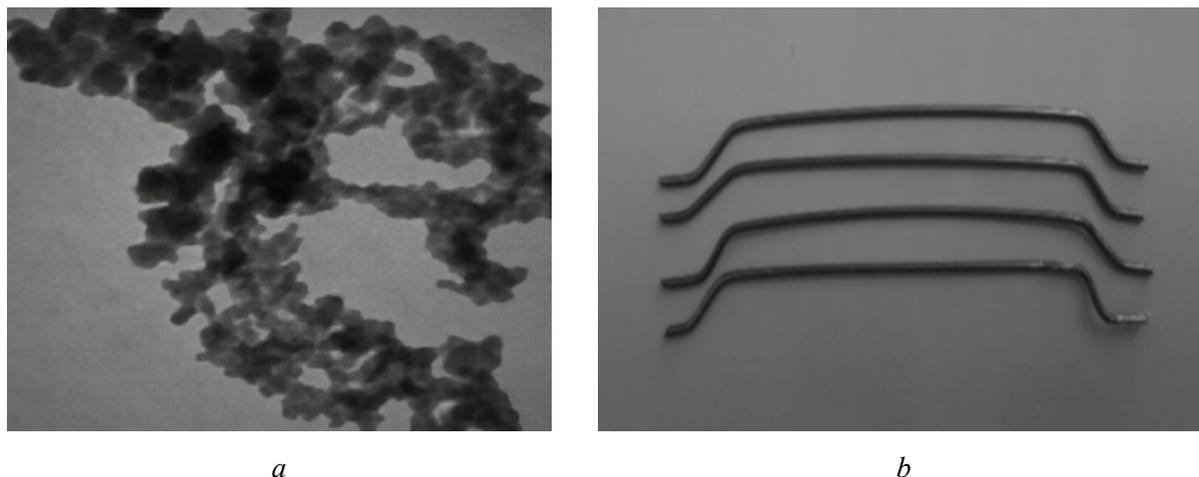


Рис. 1. Рентгеновский снимок нанокремнезема (а) и стальные волокна с концевыми загибами (b)
 Fig. 1. X-ray image of nano-silica (a) and steel fibers with end bends (b)

С учетом сцепления со стальными волокнами сопротивление образцов легкого бетона представлено выражением

$$R_{\text{сц}} = k_x \cdot \omega \cdot l \cdot \mu_{\text{vf}} \cdot k_{\tau} \cdot 2\tau_{\text{сц}}, \quad (1)$$

где k_x – коэффициент учета расположения в пространстве; ω – коэффициент формы; l и μ_{vf} – длина заделки и коэффициент влияния стальных волокон; k_{τ} – коэффициент влияния напряжений; $\tau_{\text{сц}}$ – прочностная характеристика сцепления материала.

Тогда прочность на уровне контакта с учетом параметров волокон имеет вид

$$R_{\text{к}} = \mu_{\text{vf}} \cdot \omega \cdot (2\delta / r + \delta^2 / r^2) \cdot R_z, \quad (2)$$

где R_z и δ – силовая характеристика и толщина места контакта; r – радиус загиба волокон.

В итоге прочность при сжатии будет

$$R_{\text{сж}} = (1 - \mu_{\text{vf}} \cdot \omega \cdot (1 + 2\delta / r + \delta^2 / r^2) \cdot R_b), \quad (3)$$

где R_b – временное сопротивление сжатию.

По аналогии с зависимостью И.А. Лобанова [16] получим

$$R_{\text{fb}} = R_{\text{сц}} + R_{\text{к}} + R_{\text{сж}}. \quad (4)$$

Характеристики стальных волокон представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры и свойства стальных волокон

Table 2

Parameters and properties of steel fibers

Форма	Поперечное сечение	Длина, мм	Диаметр, мм	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³
Прямая с загибами	Круговое	50	0,8	1100	7850

При определении состава учитывались максимальные размеры заполнителя. Компоненты смеси приведены в табл. 3.

Таблица 3

Компоненты смеси на 1 м³ легкого бетона

Table 3

Components of the mixture in 1 m³ of light concrete

Цемент, кг/м ³	Заполнитель		В/Ц, %	Суперпластифи- катор, %
	крупный, кг/м ³	мелкий, кг/м ³		
500	350	850	0,38	2

Процесс изготовления образцов распределялся на четыре группы и проходил при температуре 23 °С.

Сначала в 1-й группе был изготовлен контрольный образец легкого бетона (ЛБ) без дополнительных элементов. Далее смесь второй группы пополнялась стальными волокнами (ЛБВ), которые занимали 1, 1,5 и 2 % от объема бетона. Затем в смесь 3-й группы вводился нанокремнезем с содержанием 1, 3 и 5 % от массы цемента (ЛБН). И в последнюю очередь для смеси 4-й группы процесс изготовления предусматривал добавку 1 % стальных волокон и 3 % нанокремнезема (ЛБВН). Для 3-й и 4-й групп в цемент вводился нанокремнезем и засыпался заполнитель. Полученная масса перемешивалась в течение 2 мин. Далее в образовавшуюся смесь включался компонент, состоящий из воды и пластификатора. После перемешивания во 2-ю и 4-ю группы добавлялись стальные волокна.

Процесс качественного уплотнения компонентов осуществлялся с помощью послойного вибрирования. Смесь укладывалась в специальные емкости, что позволило получить образцы размером 100 × 200 мм.

Результаты

Для проведения исследований было приготовлено и обработано 36 образцов. Все они подвергались воздействию высоких температур в печи при режимах 250, 400 и 550 °С. Регистрация тепловых процессов осуществлялась с помощью датчиков-термопаров.

На первом этапе повышение температуры осуществлялось со скоростью 3 °С в минуту. Затем процесс нагрева проходил медленными темпами и при достижении максимальной температуры образцы выдерживали в печи еще на протяжении 30 мин.

Следующий этап исследований включал испытание образцов на сжатие.

Как показали результаты, добавление стальных волокон в легкий бетон немного увеличило прочность контрольной группы. Образцы, в которых стальные волокна занимали 1 % от объема бетона, оказались более прочными. Однако полученные значения выявили слабое влияние стальных волокон. Дальнейшее добавление процентного содержания данного материала снижало прочность бетона. Такой факт можно объяснить тем, что увеличение доли волокон приводит к образованию узких зон и препятствует процессу предотвращения роста трещин.

Порошкообразный нанокремнезем в объеме до 3 % после введения в образцы улучшил микроструктуру и повысил прочность бетона на сжатие. Однако принятое для эксперимента

содержание добавки на уровне 5 % увеличило объем продуктов гидратации на границе раздела «заполнитель – цементный камень» и снизило прочностные характеристики бетона.

Исследование образцов с комбинацией из 1 % стального волокна и 3 % нанокремнезема оказалось самым результативным и выявило высокий (на 41 % больше, чем у контрольного образца) рост прочности бетона на сжатие.

Динамика изменения предела прочности исследуемого материала при указанных температурных режимах выявила одинаковую закономерность и имела нелинейный характер. Разница заключается лишь в меньшем снижении прочности образцов с более высоким процентным содержанием стальных волокон.

Как видно, полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении прочности легкого бетона вследствие действия высоких температур. Однако введение добавок стального волокна и нанокремнезема в образцах существенно повышают прочность бетона на сжатие.

Завершающим этапом исследований стало испытание бетона на растяжение.

Результаты показали, что включение стальных волокон в количестве 2 % от объема бетона повысило прочность контрольных образцов на 97 %, т.е. почти вдвое, а добавление 1 и 1,5 % стальных волокон показало меньший рост прочности (52 и 75 % соответственно).

В случае введения в бетон 3 % нанокремнезема получена наибольшая прочность на растяжение. Повышение процентной доли такой добавки оказалось излишним и привело к увеличению продуктов гидратации.

Использование комбинации 4-й группы (1 % стальных волокон и 3 % нанокремнезема) увеличило прочность бетона на растяжение по сравнению с образцами, содержащими 1 % стальных волокон или 1 % нанокремнезема. Последующее повышение доли волокна до 2 % привело к самой высокой прочности образцов.

При всех температурных режимах увеличение процентного содержания стальных волокон позитивно отражалось на прочности. Динамика изменения предела прочности исследуемого материала на растяжение имела такую же закономерность, как при сжатии.

Благодаря введению стальных волокон и нанокремнезема значительно снижается износ материала. По данным проведенных исследований, выявлены закономерности изменения прочности, имеющие нелинейный характер.

На основании полученных результатов определялся модуль упругости образцов (рис. 2).

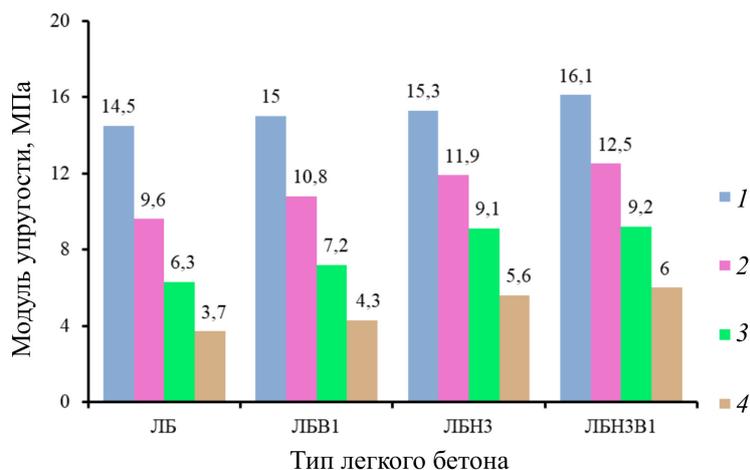


Рис. 2. Модуль упругости образцов в зависимости от температуры, °С: 1 – 23; 2 – 250; 3 – 400; 4 – 550
Fig. 2. Modulus of elasticity of samples as a function of temperature, °С: 1 – 23; 2 – 250; 3 – 400; 4 – 550

Как видно, модуль упругости с ростом температуры имел тенденцию к снижению во всех исследуемых образцах. Такая ситуация объясняется тем, что введенные в бетон компоненты оказывали определенное сопротивление воздействию высоких температур. Введение стальных волокон приводило к упрочнению образцов.

С помощью специально разработанной методики по введению стальных волокон в бетон выявлен связующий эффект, что позволило получить повышенный модуль упругости материала.

Образец, в который добавлялись стальные волокна и нанокремнезем, обладал самым высоким модулем упругости.

Сравнение полученных результатов для образцов с волокнами и образцов, содержащих нанокремнезем, показало, что более высокий модуль упругости определен в случае наличия нанокремнезема. Введение nano-SiO_2 позволило улучшить гидратацию и структуру бетона и снизить влияние роста микротрещин от действия приложенной нагрузки.

На рис. 3 показаны зависимости «напряжения – деформации» при различных температурных режимах для образцов в соответствии с рис. 2.

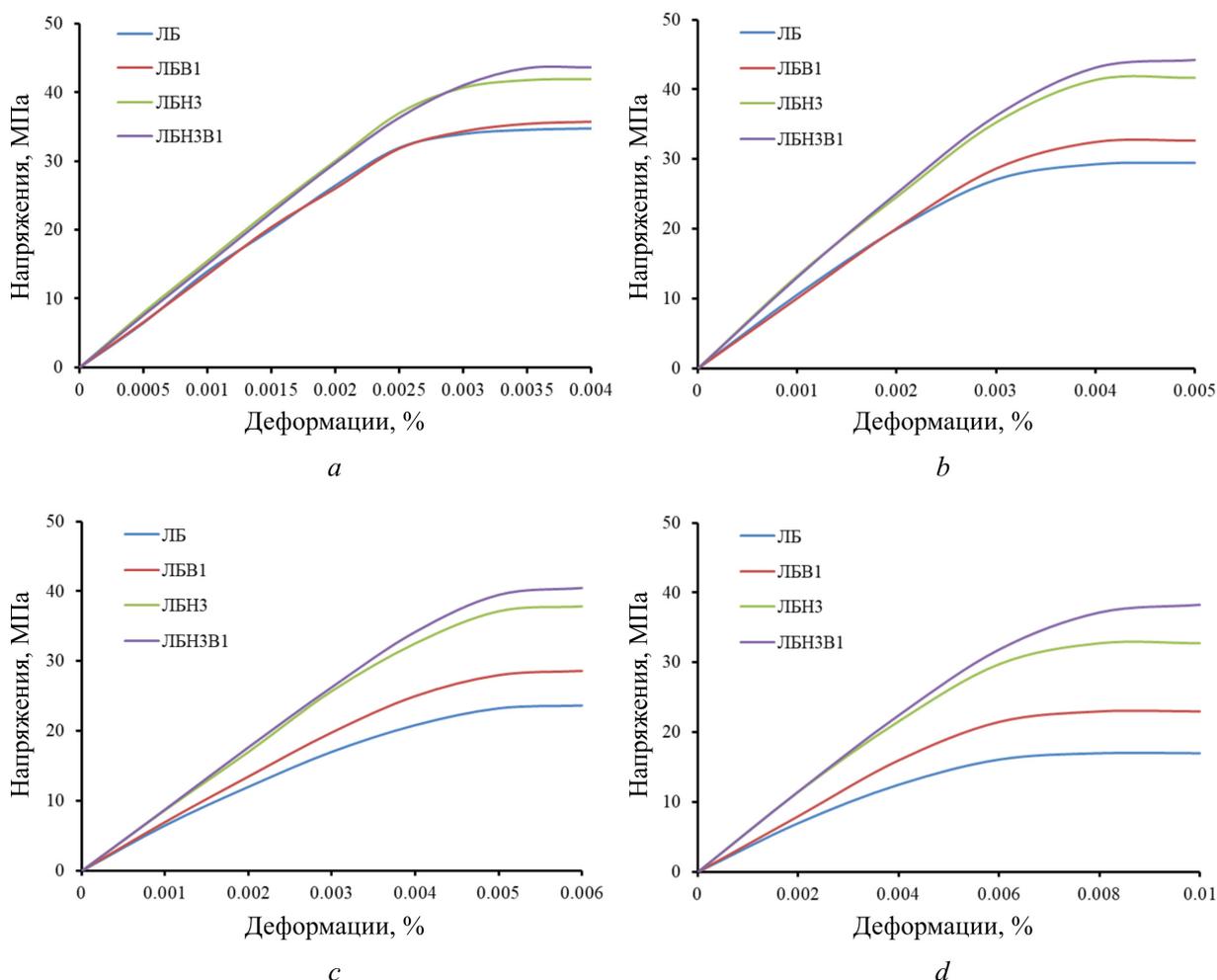


Рис. 3. Зависимости напряжения – деформации образцов при температуре, °С:
 $a - 23$; $b - 250$; $c - 400$ и $d - 550$

Fig. 3. Dependences of the stress-strain state of samples on temperature, °С:
 $a - 23$; $b - 250$; $c - 400$ and $d - 550$

Использование 1 % стальных волокон и 3 % нанокремнезема в качестве совместной добавки еще больше повысило напряжения и увеличило прочностные и деформативные характеристики легкого бетона.

На основании полученных зависимостей выявлены общие закономерности работы легкого бетона. В частности, наблюдалось увеличение напряжений и деформаций при повышении процентного содержания стальных волокон. Причем с введением нанокремнезема зафиксирован существенный рост напряжений при изменении уровня деформаций. Такие показатели получены благодаря улучшению структуры бетона и ускорению процесса гидратации.

Плавное изменение напряжений от нагрузок отражало закономерности работы образцов и соответствовало результатам испытаний. Значительные потери прочности и жесткости выявлены при максимальной температуре у образцов контрольной группы.

Рост деформаций с повышением температуры объясняется ослаблением компонентов, входящих в состав бетона и различием свойств заполнителя и цементного камня.

Заключение

Выполнены комплексные исследования прочности легкого бетона от влияния различных температурных режимов. Выявлены физические процессы реакции материала и общие закономерности механического разрушения испытанных образцов. Благодаря использованию добавок в виде стальных волокон и нанокремнезема обеспечена значительная сопротивляемость легкого бетона на действие высоких температур и возможных нагрузок.

Проанализированы результаты проведенных исследований, по итогам которых определены прочностные характеристики, выявлен модуль упругости и построены графические зависимости. С ростом температуры зафиксирован нелинейный характер снижения прочности бетона независимо от наличия и вида добавки.

Показано, что только ограниченное по объему процентное содержание стальных волокон существенно уменьшает распространение трещин и улучшает характеристики бетона при растяжении. Благодаря позитивному влиянию нанокремнезема на процесс гидратации и микроструктуру бетона существенно повышается прочность на сжатие и модуль упругости материала.

Использование добавок в виде комплексного включения стальных волокон и нанокремнезема показало улучшение механических свойств образцов при различных температурных режимах. Введенный материал препятствовал распространению трещин и снижал степень растрескивания бетона. Тем не менее из двух добавок наибольший эффект против развития трещин оказывали стальные волокна. Кроме того, с введением нанокремнезема зафиксирован существенный рост напряжений при изменении уровня деформаций. Использование 1 % стальных волокон и 3 % нанокремнезема в качестве совместной добавки значительно повышает сопротивляемость действующим нагрузкам и улучшает характеристики легкого бетона.

Сравнение результатов показало, что самый высокий модуль упругости получен в случае введения нанокремнезема. Проведенные исследования имеют прикладной характер и ориентированы на разработку комплексной методологии повышения прочностных характеристик легкого бетона как конструкционного материала объектов строительства в условиях высоких температур. Важно учитывать полученные результаты при

проектировании высотных зданий и большепролетных мостов, разрушение которых в случае возникновения пожара может привести к огромным жертвам и большим материальным затратам.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Агамов, Р.Э. Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения / Р.Э. Агамов, М.А. Гончарова, А.Р. Пачин // Строительные материалы. – 2023. – № 1–2. – С. 39–43.
2. Абдрахимов, В.З. Жаростойкий бетон на основе ортофосфорной кислоты, отходов цветной металлургии и химической промышленности / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 72–85. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.06
3. Исследование деформативных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста / Б.А. Бондарев, Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, В.А. Стурова // Construction and Geotechnics. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 18–31. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02
4. Guler, S. Residual strength and toughness properties of 3D, 4D and 5D steel fiber-reinforced concrete exposed to high temperatures / S. Guler, Z.F. Akbulut // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 327. – P. 126945. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126945
5. Abbass, W. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete / W. Abbass, M.I. Khan, S. Mourad // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 168. – P. 556–569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164
6. Sustainability of using steel fibers in reinforced concrete deep beams without stirrups / G. Almasabha, Y. Murad, A. Alghossoon, E. Saleh, A. Tarawneh // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 4721. DOI: 10.3390/su15064721
7. Grabois, T. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers / T. Grabois, G. Cordeiro, R.D.T. Filho // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 104. – P. 284–292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060
8. Mechanical behavior of steel fiber-reinforced lightweight concrete exposed to high temperatures / H. Wang, M. Wei, Y. Wu, J. Huang, H. Chen, B. Cheng // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 11 (1). – P. 116. DOI: 10.3390/app11010116
9. Kalpana, M. Light weight steel fibre reinforced concrete: A review / M. Kalpana, A. Tayu // Mater. Today Proc. – 2020. – Vol. 22, iss. 3. – P. 884–886. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.095
10. Урханова, Л.А. Исследование влияния пирогенного нанокремнезема на тепловыделение и микроструктуру цементного камня / Л.А. Урханова, С.А. Лхасаранов, Э.В. Бадмаева // Строительные материалы. – 2020. – № 1–2. – С. 3–7. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-3-7
11. Сиянов, А.И. Исследование применения аэрогелей из кремнезема / А.И. Сиянов, Д.И. Абдулманов // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 83–93. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.06
12. Структурная модификация новообразований в цементной матрице дисперсиями углеродных нанотрубок и нанокремнеземом / Г.И. Яковлев, И.С. Полянских, Г.Н. Первушин,

Г. Скрипкюнас, И.А. Пудов, Е.А. Карпова // *Строительные материалы*. – 2016. – № 1–2. – С. 16–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-733-734-1-2-16-20

13. Nazari, A. Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles / A. Nazari, S. Riahi // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – Vol. 527 (29). – P. 7663–7672. DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.095

14. Yu, R. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 65. – P. 140–150. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063

15. Performance and microstructure analysis of high-strength concrete incorporated with nanoparticles subjected to high temperatures and actual fires / D.E. Tobbala, A.S. Rashed, B.A. Tayeh, T.I. Ahmed // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2022. – Vol. 22, iss. 85. DOI: 10.1007/s43452-022-00397-6

16. Лобанов, И.А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов: фибробетонов: дис. ... д-ра. техн. наук / И.А. Лобанов. – Л., 1982. – 384 с.

References

1. Agamov R.E.H., Goncharova M.A., Pachin A.R. Vysokoprochnye fibrobetony v konstruktsiyakh obshchestvoitelnogo i spetsial'nogo naznacheniya [High-strength fiber-reinforced concrete in general construction and special purposes structures]. *Stroitel'nye materialy*, 2023, no. 1–2, pp. 39–43.

2. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimov E.S. Heat-resistant concrete based on orthophosphoric acid, waste of non-ferrous metallurgy and chemical industry. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 1, pp. 72–85. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.06.

3. Bondarev B.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Studying deformation properties of steel fiber slag reinforced concrete under axial tension and compression in view of its age. *Construction and Geotechnics*, 2017, vol. 8, iss. 1, pp. 18–31. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02.

4. Guler S., Akbulut Z.F. Residual strength and toughness properties of 3D, 4D and 5D steel fiber-reinforced concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 327, p. 126945. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126945.

5. Abbass W., Khan M.I., Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 168, pp. 556–569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164.

6. Almasabha G., Murad Y., Alghossoon, A., Saleh E., Tarawneh A. Sustainability of using steel fibers in reinforced concrete deep beams without stirrups. *Sustainability*, 2023, vol. 15, p. 4721. DOI: 10.3390/su15064721.

7. Grabois T., Cordeiro G., Filho R.D.T. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 104, pp. 284–292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060.

8. Wang H., Wei M., Wu Y., Huang J., Chen H., Cheng B. Mechanical behavior of steel fiber-reinforced lightweight concrete exposed to high temperatures. *Applied Sciences*, 2020, vol. 11, iss. 1, p. 116. DOI: 10.3390/app11010116.

9. Kalpana M., Tayu A. Light weight steel fibre reinforced concrete: A review. *Mater. Today Proc.*, 2020, vol. 22, iss. 3, pp. 884–886. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.095.
10. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Badmaeva E.H.V. Issledovanie vliyaniya pirogenogo nanokremnezema na teplovydelenie i mikrostrukturu tsementnogo kamnya [Research of the influence of pyrogenic nanosilica on the heat hydration and cement stone microstructure]. *Stroitel'nye materialy*, 2020, no. 1–2, pp. 3–7. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-3-7.
11. Siyanov A.I., Abdulmanov D.I. Research on the use of silica aerogels. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 4, pp. 83–93. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.06.
12. Yakovlev G.I. Polyanskikh I.S. Pervushin G.N. Skripyunas G. Pudov I.A. Karpova E.A. Strukturnaya modifikatsiya novoobrazovaniy v tsementnoy matritse dispersiyami uglerodnykh nanotrubok i nanokremnezemom [Structural modification of new formations in cement matrix using carbon nanotube dispersions and nanosilica]. *Stroitel'nye materialy*, 2016, no. 1–2, pp. 16–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2016-733-734-1-2-16-20.
13. Nazari A., Riahi S. Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527 (29), pp. 7663–7672. DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.095.
14. Yu R., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 65, pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063.
15. Tobbala D.E., Rashed A.S., Tayeh B.A., Ahmed T.I. Performance and microstructure analysis of high-strength concrete incorporated with nanoparticles subjected to high temperatures and actual fires. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, vol. 22, iss. 85. DOI: 10.1007/s43452-022-00397-6.
16. Lobanov I.A. Osnovy tekhnologii dispersno-armirovannykh betonov: fibrobetonov [Fundamentals of technology of dispersed reinforced concrete: fibroconcrete]. Doctor's degree dissertation. Leningrad, 1982, 384 p.