

УДК 691.3

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор
© Д. А. Пантелеев, канд. техн. наук, доцент
© М. И. Жаворонков, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: dm-pant@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-1-66-74

© Yu. V. Pukharenko, Dr. Sci. Tech., Professor
© D. A. Panteleev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© M. I. Zhavoronkov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: dm-pant@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

THE INFLUENCE OF DISPERSED REINFORCEMENT ON CONCRETE STRENGTH UNDER HIGH-TEMPERATURE HEATING

Статья посвящена исследованию влияния стальной проволочной фибры на прочностные характеристики мелкозернистого бетона при воздействии высоких температур в 200, 400 и 600 °С. Изучен характер и особенности процессов разрушения сталефибробетона после высокотемпературного нагрева. На основании полученных данных сделан вывод о том, что нагрев бетонных и фибробетонных образцов до 200 °С приводит к повышению прочности при сжатии и изгибе, что обусловлено активизацией процессов гидратации, повышающих прочность сцепления в зоне контакта стальной фибры с матрицей. При определенном расходе волокон можно обеспечивать прочность материала на высоком уровне даже при температуре 400 °С. При температурах, близких к 600 °С, происходит удаление химически связанной воды и нарушение сцепления стальной фибры с цементным камнем, что приводит к существенному понижению прочности фибробетона в целом.

Ключевые слова: фибробетон, композит, дисперсное армирование, фибра, высокотемпературный нагрев, прочность.

This article examines the influence of steel wire fibers on the strength properties of fine-grained concrete exposed to high temperatures of 200, 400, and 600 °C. The nature and characteristics of the destruction processes of steel fiber-reinforced concrete after being subjected to high-temperature heating are studied. Based on the data obtained, it is concluded that heating concrete and fiber-reinforced concrete samples to 200 °C leads to an increase in compressive and flexural strength, which is due to the activation of hydration processes, leading to an increase in the adhesion strength in the contact zone of the steel fiber with the matrix. With certain fiber consumption, it is possible to ensure high material strength even at temperature of 400 °C. At temperatures close to 600 °C, chemically bound water is removed and the adhesion of the steel fiber to the cement stone is disrupted, which leads to a significant decrease in the strength of fiber-reinforced concrete as a whole.

Keywords: fiber-reinforced concrete, composite, dispersed reinforcement, fiber, high-temperature heating, concrete strength.

Введение

Влияние высоких температур на различные характеристики бетона, в первую очередь на прочность, представляет значитель-

ный интерес и изучается специалистами во всем мире [1–5]. При этом анализ результатов, имеющих в технической литературе, показывает, что высокотемпературное воз-

действие может привести как к уменьшению прочности бетона, вызванному неоднородными температурными деформациями или потерей химически связанной воды, так и к ее увеличению за счет уплотнения структуры и углубления процессов гидратации минералов цементного камня [6–10]. Таким образом, структура и свойства бетона при действии высоких температур существенно отличаются от первоначального состояния и зависят от уровня воздействия, а также от вида и характеристик применяемых заполнителя и цемента, так как известно [11], что в данном случае цементный камень разрушается под влиянием градиентов влажности и пористости либо по самому цементному камню, либо по контактной зоне с заполнителем.

Существуют различные способы повышения огнестойкости и температуростойкости цементных бетонов, одним из которых является дисперсное армирование. Однако вопросы поведения фибробетона под действием высоких температур до сих пор изучены недостаточно, а поступающая информация довольно противоречива. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего изучения поведения фибробетона при действии высокотемпературного нагрева.

Целью данного исследования являлось определение влияния дисперсного армирования стальной проволочной фиброй на процесс разрушения и показатели прочности цементного бетона при воздействии высоких температур.

Методы и материалы

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства *Heidelberg cement* (АО «Сланцевский цементный завод „Цесла“») по ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»;
- песок кварцевый с модулем крупности 2,2 и насыпной плотностью 1590 кг/м³

по ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;

- фибра стальная (рис. 1), рубленная из проволоки (РП), волновая (В), круглого сечения, длиной 22 мм и диаметром 0,3 мм по ТУ 14-1-5564–2008 «Фибра из стальной проволоки для дисперсного армирования бетона. Технические условия»;

- пластификатор «Синтефлоу Мега 52» на основе поликарбоксилатного эфира в соответствии с ТУ 2216-008-78722668–2015 «Гиперпластификатор *Sinteflow*».

В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый бетон, обеспечивающий высокую степень насыщения и высокую дисперсность армирования стальной фиброй.

Все образцы, изготовленные в ходе исследований, имели одинаковый состав матрицы: Ц : П = 1 : 2,2 при В : Ц = 0,37 и расходе добавки суперпластификатора 0,6 % от массы портландцемента (табл. 1).

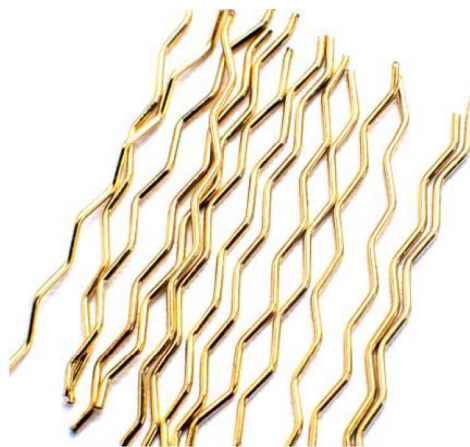


Рис. 1. Стальная проволочная фибра

Таблица 1

Состав исходного бетона

Сырьевые материалы	Расход материалов, кг/м ³
Портландцемент	660
Кварцевый песок	1454
Суперпластификатор	3,96
Вода	244

Приготовление фибробетонных смесей осуществлялось в лабораторном бетоносмесителе при следующей очередности загрузки компонентов: песок, портландцемент и вода с растворенной в ней добавкой суперпластификатора. По готовности цементно-песчаного раствора в него вводилась стальная фибра, и перемешивание продолжалось до обеспечения равномерного распределения фибры по всему объему смеси.

Процесс твердения и набор прочности бетонных и фибробетонных образцов осуществлялся в камере нормального твердения при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(95 \pm 5)\%$ в течение 28 суток.

Для нагрева образцов в процессе испытания до 200, 400 и 600 °С использовалась электрическая муфельная печь (рис. 2).

Испытание изготовленных образцов проводилось следующим образом:

- подъем температуры в муфельной печи до 200 °С составлял 10 мин, до 400 °С —

20 мин, до 600 °С — 30 мин, после чего печь открывалась, в нее укладывались образцы и печь быстро закрывалась;

- изотермическая выдержка бетонных и фибробетонных образцов при заданной температуре составляла 4 ч;



Рис. 2. Муфельная печь

Таблица 2

Результаты определения свойств бетонных и фибробетонных образцов после температурного воздействия

№ состава	Содержание фибры, % по об.	Температура T , °С	Свойства		
			Средняя плотность, ρ , кг/м ³	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа
1	0	20	2202	52,8	6,3
2	0,5		2237	54,2	6,9
3	1,0		2270	56,8	10,1
4	2,0		2324	58,5	13,4
5	0	200	2148	61,4	8,2
6	0,5		2175	63,4	9,0
7	1,0		2207	65,8	12,7
8	2,0		2262	68,7	15,4
9	0	400	2115	55,7	2,1
10	0,5		2158	58,4	3,3
11	1,0		2198	59,1	7,1
12	2,0		2250	60,6	11,0
13	0	600	2109	26,7	1,2
14	0,5		2151	31,0	2,8
15	1,0		2172	33,5	4,8
16	2,0		2233	35,1	5,7

• по завершении изотермической выдержки печь открывалась, образцы извлекались на металлический поддон, на котором происходило их остывание до температуры окружающей среды 20–25 °С.

Прочность бетона и сталефибробетона определялась в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Испытание прочности при сжатии производилось на образцах-кубах размером 100×100×100 мм, прочности на растяжение при изгибе — на образцах-балках размером 70×70×280 мм.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний бетонных и фибробетонных образцов приведены в табл. 2.

Как видно из полученных данных, средняя плотность образцов после высокотемпературного нагрева уменьшалась (рис. 3), что объясняется испарением физически связанной воды, которая удерживается на поверхности и внутри бетона за счет сил адсорбции и связей (силы Ван-дер-Ваальса и водородные связи), а также разложением цементного камня и заполнителей с высвобождением химически связанной воды, которая является частью гидратов.

На рис. 4 представлены зависимости отношения прочности образца после темпе-

ратурного воздействия (R_g^T) к прочности неармированного образца без температурного воздействия ($R_g^{20\text{ °C}}$) от объемного содержания фибры.

Дисперсное армирование пусть и незначительно, но все же позволяет повысить прочность при сжатии бетонных образцов, не подвергавшихся температурному воздействию (рис. 4, а). Объемное содержание стальной фибры в количестве 0,5 % повышает прочность бетона в условиях нормальной температуры на 2,7 %; 1,0 % — на 7,6 %; 2,0 % — на 10,8 %. При этом, как и ожидалось, более существенным оказывается дисперсное армирование на прочность бетона при изгибе, которая линейно возрастает, начиная с содержания волокон 0,5 % по объему. Однако особое влияние стальной фибры на бетон отмечается после высокотемпературного нагрева в 200, 400 и 600 °С, что может быть объяснено сдерживающим влиянием дисперсного армирования на процессы образования и развития микротрещин в структуре бетона. При этом температурное воздействие на бетонные и фибробетонные образцы, равное 200 °С, позволило добиться повышения прочности при сжатии на 15,8–17,4 %, что объясняется созданием весьма благоприятных условий (повышен-

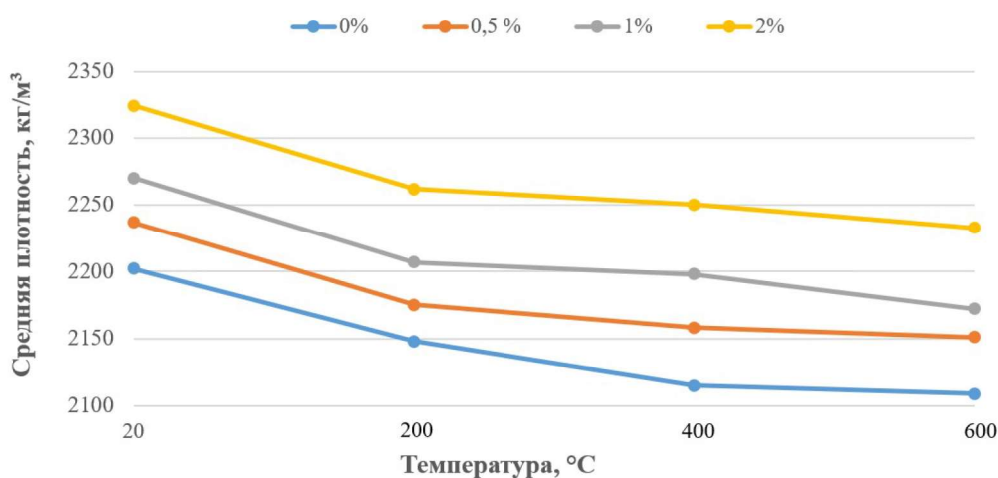


Рис. 3. Изменение средней плотности образцов после температурного воздействия в зависимости от объемного содержания фибры

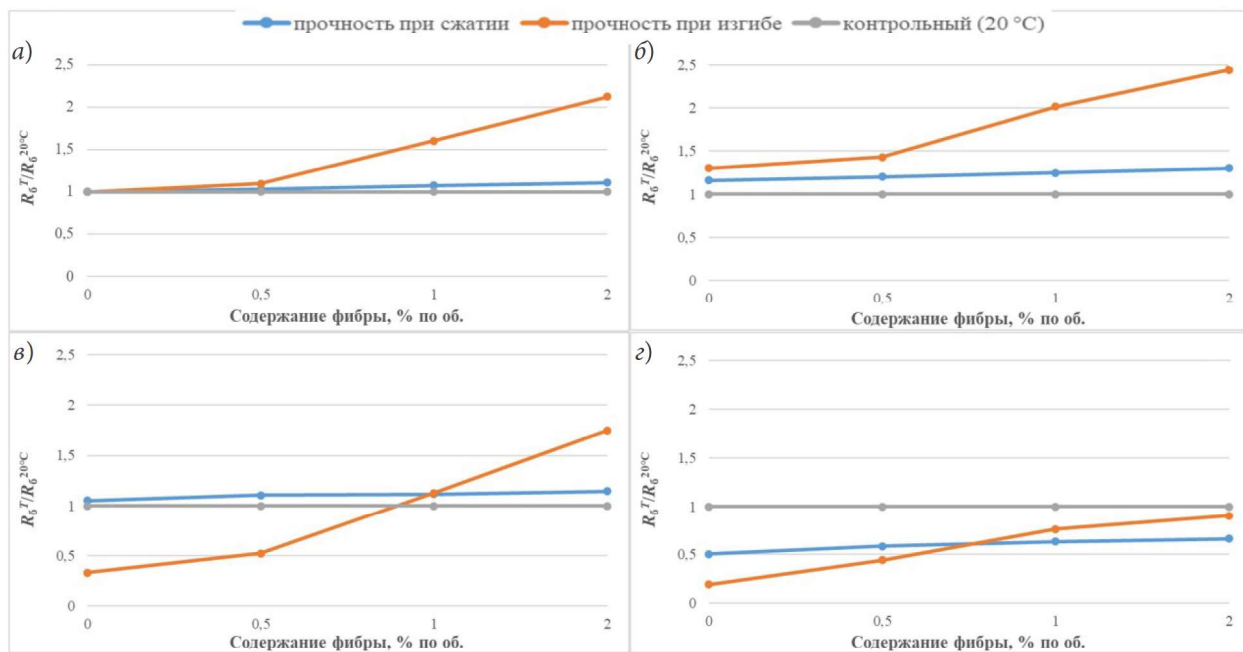


Рис. 4. Зависимость отношения $R_6^T/R_6^{20°C}$ от объемного содержания фибры после выдержки образцов при температуре: а — 20 °С; б — 200 °С; в — 400 °С; г — 600 °С

ные значения температуры и давления пара) для продолжения процесса гидратации цементного камня (рис. 4, б). Рост прочности в интервале температуры от 200 до 400 °С продолжается за счет релаксации структурных напряжений на границе «цементный камень–заполнитель» и удаления химически связанной воды, что приводит к повышению прочности сцепления фибры с матрицей и ее способности сдерживать развитие микротрещин в структуре бетона.

На рис. 5 приведены фотографии фибры после температурного воздействия на фибробетонные образцы, полученные при помощи оптического микроскопа при четырехкратном увеличении.

На рисунке отчетливо видно улучшение сцепления фибры с бетонной матрицей композита, что позволяет при определенном насыщении фиброй обеспечивать прочность материала на высоком уровне даже при температуре 400 °С (рис. 4, в).

При температурах, близких к 600 °С, из-за ускоренной дегидратации разрушается

цементный камень, происходит удаление химически связанной воды и разложение гидроксида кальция в контактной зоне «фибра–матрица», что приводит к нарушению сцепления стальной фибры с цементным камнем и, следовательно, к потере способности сопротивляться напряжениям и существенному понижению прочности фибробетона в целом (рис. 4, г). Однако даже в этом случае дисперсное армирование позволяет во многом сохранить несущую способность конструкции, так как наблюдаемое в эксперименте снижение прочности при 2 %-ном насыщении фиброй оказывается не столь существенным.

После высокотемпературного нагрева при 600 °С в неармированных образцах без какого-либо механического воздействия возникают магистральные трещины (рис. 6), что объясняется разностью деформаций цементного камня и заполнителя.

Именно по образовавшейся после воздействия высокой температуры магистральной трещине происходило разрушение неарми-

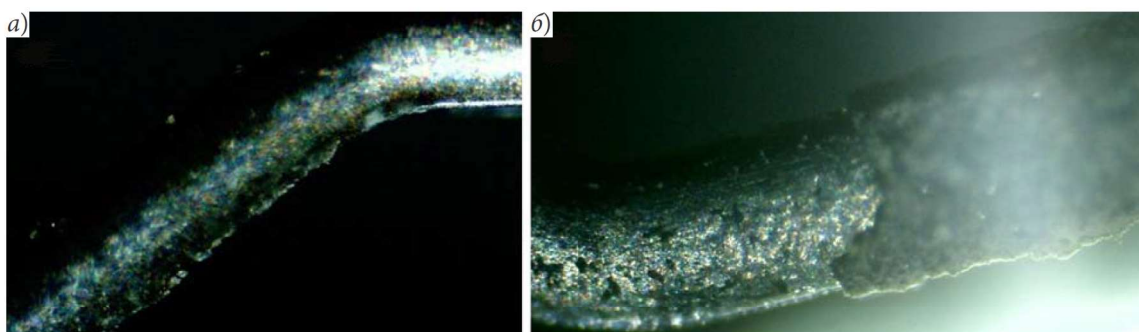


Рис. 5. Микрофотография стальной фибры из фибробетонного образца: а — без высокотемпературного нагрева; б — после высокотемпературного нагрева в 400 °С



Рис. 6. Неармированный образец после выдержки при 600 °С

рованных образцов (рис. 7, а) в момент испытания на сжатие, чем и объясняется столь резкое снижение прочности. Дисперсное армирование образцов позволяет повысить сопротивление раскрытию магистральной трещины за счет высокомодульных стальных волокон, сохраняющих в определенной степени прочность сцепления в зоне контакта с матрицей и являющихся барьером на пути растущих трещин. При этом образец демонстрирует вязкий характер разрушения (рис. 7, б).

Взрывное разрушение наблюдалось в образцах при температурах в 400 и 600 °С (рис. 8). Данное явление объясняется возникающими напряжениями в бетоне, вызванными градиентом температуры при нерав-

номерном нагреве и переносе водяного пара внутри пористой структуры бетона. С повышением температуры при недостаточном объеме внутреннего порового пространства, сообщающегося с поверхностью, давление пара в порах резко увеличивается. Если давление пара превышает прочность бетона при растяжении, происходит взрывное разрушение, что подтверждается в работах и других авторов [12].

Таким образом, использование стальной фибры не позволяет защитить бетонную конструкцию от подобного разрушения, во всяком случае при параметрах армирования, предусмотренных данным экспериментом. Тем не менее применение стальной фибры позволяет повысить вязкость разрушения композита. В момент испытания она вытягивается из бетона, тем самым препятствуя разрушению, что подтверждают результаты более ранних работ [13–15]. Таким образом, конструкции, изготовленные из сталефиброжелезобетона, более безопасны при пожаре и зачастую остаются ремонтпригодными после него.

Для борьбы с возникновением взрывного разрушения эффективнее использовать синтетическую микрофибру, которая полностью выгорает уже при температуре 350 °С, оставляя сетку сквозных пор и капилляров, после чего вода, содержащаяся в бетоне, получает возможность свободного выхода в виде пара [16].

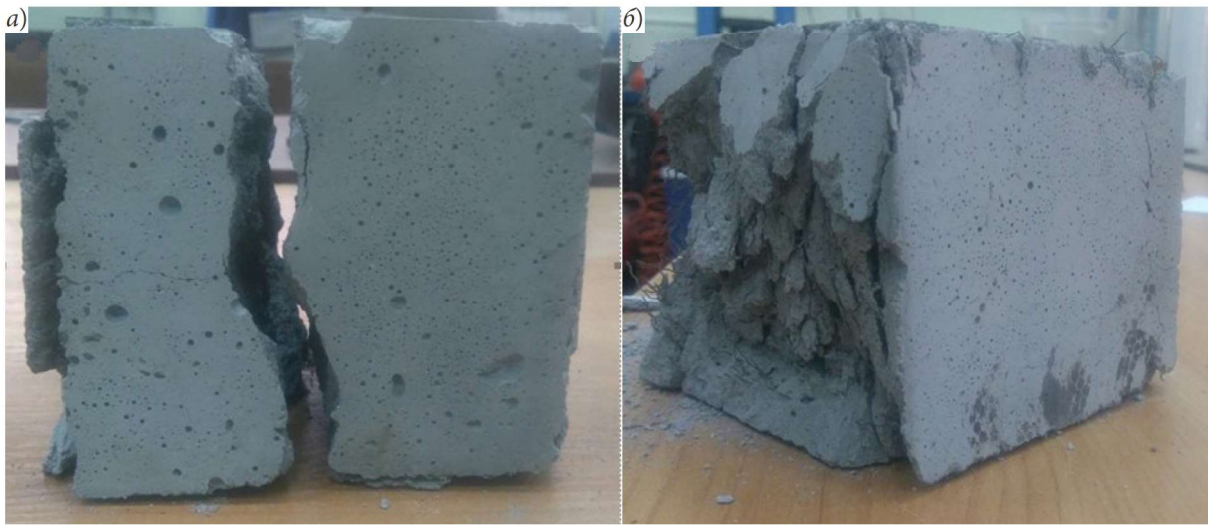


Рис. 7. Характер разрушения: а — бетонный образец (хрупкое разрушение); б — фибробетонный образец (вязкое разрушение)



Рис. 8. Поверхность сталефибробетонного образца после разрушения взрывного характера

Выводы

Нагрев бетонных и фибробетонных образцов до 200 °С и выдержка в течение 4 ч при этой температуре приводят к повышению прочности при сжатии до 18 % и при изгибе до 30,4 % от первоначальной в зависимости от объемного содержания волокон в композите. Это обусловлено активизацией процессов гидратации, приводящих к повышению прочности сцепления в зоне контакта фибры с матрицей и способности сопротивляться возникающим напряжениям, а при определенном насыщении фиброй — обеспечивать прочность материала на высоком уровне даже при температуре 400 °С.

При температурах, близких к 600 °С, происходит удаление химически связанной воды, разложение гидроксида кальция в контактной зоне «фибра–матрица», что приводит к нарушению сцепления стальной фибры с цементным камнем и, следовательно, к потере способности сопротивляться напряжениям и существенному понижению прочности фибробетона в целом. Однако даже в этом случае наблюдаемое в эксперименте снижение прочности при 2 %-ном насыщении фиброй оказывается не столь существенным.

Взрывное разрушение поверхности происходит на образцах сталефибробетона при нагреве до 400 и 600 °С.

Таким образом, использование стальной фибры при данных параметрах армирования не позволяет полностью защитить бетонную конструкцию от повреждений вследствие высокотемпературного воздействия. Однако полученные результаты и имеющиеся литературные данные позволяют предположить такую возможность в случае комбинации стальной (высокомодульной) и полимерной фибры.

Библиографический список

1. Khoury G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures // *Progress in Structural Engineering Materials*. 2000. Vol. 2 (4). Pp. 429–447.
2. Petrus C., Huurun 'Ain Azhar, Lyn Dee G., Ismail R., Alisibramulisi A. Compressive strength of concrete with fibres at elevated temperature // *Journal Technology (Sciences & Engineering)*. 2016. Vol. 78 (5–4). Pp. 71–74.
3. Перфилов В. А. Влияние высоких температур на прочность и трещиностойкость жаростойких бетонов // *Технологии бетонов*. 2012. № 1–2 (66–67). С. 36–37.
4. Хаджишалапов Г. Н., Абакаров Х. М., Багиров И. Т. Защита бетона от взрывообразного разрушения при воздействии высоких температур // *Неделя науки — 2015: сб. тезисов докладов XXXVI итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»*; под ред. Т. А. Исмаилова. Махачкала, 21–25 апреля 2015 г. Махачкала: ДГТУ, 2015. С. 156–157.
5. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А. Свойства конструкционного бетона после пожара // *Судебная экспертиза Беларуси*. 2017. № 2 (5). С. 51–57.
6. Тюмкина Е. А., Кропотова Н. А. Изучение характеристик бетона при воздействии высоких температур, приближенных к пожару // *Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск, 24 мая 2024 г. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия, 2024. С. 489–493.*
7. Голованов В. И., Новиков Н. С., Павлов В. В., Антонов С. П. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2017. № 2. С. 63–67.
8. Кострикин М. П. К вопросу о влиянии высоких температур на прочностные характеристики фибробетона // *Архитектура – строительство – транспорт: материалы 74-й науч. конф. профессорско-препода-*

вательского состава и аспирантов ун-та. В 2 т. Санкт-Петербург, 3–5 октября 2018 г. СПб.: СПбГАСУ, 2018. Т. 1. С. 128–132.

9. Несветаев Г. В., Пушенко А. С. Поведение конструкций из высокопрочного бетона в условиях пожара // *Железобетон, строительные материалы и технологии в третьем тысячелетии: межкаф. сб. науч. тр. Ростов н/Д: Ростовский гос. строительный ун-т, 2005. Вып. 4. С. 58–62.*
10. Zheng W., Li H., Wang Y. Compressive stress–strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35. Pp. 931–940.
11. Некрасов К. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур / под ред. К. Д. Некрасова. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
12. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А. Модификация диаграммы деформирования высокопрочного бетона при сжатии от нагрева // *Технологии бетонов*. 2012. № 5–6. С. 38–40.
13. Пантелеев Д. А. Оценка эффективности полиармирования фибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. № 6 (41). С. 102–108.
14. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 3 (85). С. 436–445.
15. Жаворонков М. И., Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А. Результаты исследования поведения сталефибробетона под нагрузкой при изгибе // *Экономика строительства*. 2024. № 9. С. 294–298.
16. Пухаренко Ю. В., Кострикин М. П. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 96–106.

References

1. Khoury G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering Materials*, 2000, vol. 2 (4), pp. 429–447.
2. Petrus C., Huurun 'Ain Azhar, Lyn Dee G., Ismail R., Alisibramulisi A. Compressive strength of concrete with fibres at elevated temperature. *Journal Technology (Sciences & Engineering)*, 2016, vol. 78 (5–4), pp. 71–74.
3. Perfilov V. A. Vliyaniye vysokikh temperatur na prochnost' i treshchinostoykost' zharostoykikh betonov [Influence of high temperatures on strength and crack resistance of heat-resistant concretes]. *Tekhnologii betonov – Concrete Technologies*, 2012, no. 1–2 (66–67), pp. 36–37.
4. Khadzhashalapov G. N., Abakarov Kh. M., Bagirov I. T. Zashchita betona ot vzryvoobraznogo

razrusheniya pri vozdeystvii vysokikh temperatur [Protection of concrete from explosive destruction under the influence of high temperatures]. «Nedelya nauki — 2015 Trudy XXXVI itogovoy nauch.-tekhn. konf. prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov FGBOU VO «Dagestanskiy gosudarstvenniy tekhnicheskii universitet»; Makhachkala, 21–25 aprelya 2015 g.», ed. by Ismailov T. A. [Proceedings of the “Science Week – 2015», sci. conf. of teachers, employees, graduate students and students of the Dagestan State Technical University; Makhachkala, April 21–25, 2015,” ed. by Ismailov T. A.]. Makhachkala, DGTU Publ., 2015, pp. 156–157.

5. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A. *Svoystva konstruktsionnogo betona posle pozhara* [Properties of structural concrete after fire]. *Sudebnaya ekspertiza Belarusi – Forensic examination in Belarus*, 2017, no. 2 (5), pp. 51–57.

6. Tyumkina E. A., Kropotova N. A. *Izuchenie kharakteristik betona pri vozdeystvii vysokikh temperatur, priblizhennykh k pozharu* [Study of concrete characteristics when exposed to high temperatures close to fire]. «*Molodye uchentye v reshenii aktual'nykh problem bezopasnosti*». *Trudy VI Vseros. nauch.-prakt. konf. Zheleznogorsk, 24 maya 2024 g.* [“Young scientists in solving pressing security problems”. Proceedings of the VI All-Russia sci.-pract. conf. Zheleznogorsk, May 24, 2024]. Zheleznogorsk, Sibirskaya pozharno-spatatel'naya akademiya Publ., 2024, pp. 489–493.

7. Golovanov V. I., Novikov N. S., Pavlov V. V., Antonov S. P. *Prochnostnye kharakteristiki fibrobeta dlya tonnel'nykh sooruzheniy v usloviyakh vysokikh temperatur* [Strength characteristics of fiber concrete for tunnel structures at high temperatures]. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya – Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2017, no. 2, pp. 63–67.

8. Kostrikin M. P. *K voprosu o vliyaniy vysokikh temperatur na prochnostnye kharakteristiki fibrobeta* [On the effect of high temperatures on the strength characteristics of fiber concrete]. *Arkhitektura – stroitel'stvo – transport. Trudy 74-y nauch. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava i aspirantov un-ta, v 2 ch. Sankt-Peterburg, 3–5 oktyabrya 2018 g.* [Architecture - Construction – Transport. Proceedings of the 74-th scientific conf. of faculty and graduate students, in 2 pts., St. Petersburg, October 3–5, 2018]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, vol. 1, pp. 128–132.

9. Nesvetaev G. V., Pushenko A. S. *Povedenie konstruksiy iz vysokoprochnogo betona v usloviyakh pozhara* [Behavior of structures built of high-strength concrete in fire conditions]. «Zhelezobeton, stroitel'nye materialy i tekhnologii v tret'em tysyacheletii». *Trudy mezhkaf. sb. nauch. konf. Rostov n/D* [«Reinforced concrete, building materials and technology in the third millennium». Proceedings of the Rostov-on-Don university sci. conf.]. Rostov-on-Don State Construction University Publ., 2005, iss. 4, pp. 58–62.

10. Zheng W., Li H., Wang Y. Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 35, pp. 931–940.

11. Nekrasov K. D., Zhukov V. V., Gulyaeva V. F. *Tyazhelyy beton v usloviyakh povyshennykh temperatur* [Heavy concrete at elevated temperatures]. Ed. by Nekrasov K. D. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 128 p.

12. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A. *Modifikatsiya diagrammy deformirovaniya vysokoprochnogo betona pri szhatii ot nagreva* [Modification of the diagram of deformation of high-strength concrete during compression from heating]. *Tekhnologii betonov – Concrete Technologies*, 2012, no. 5–6, pp. 38–40.

13. Pantelev D. A. *Otsenka effektivnosti poliarmirovaniya fibrobeta* [Assessment of the effectiveness of poly-reinforcement of fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 6 (41), pp. 102–108.

14. Pukharenko Yu. V., Pantelev D. A., Zhavoronkov M. I. *Vliyanie vida fibry i sostava matritsy na ikh stseplenie v fibrobeta* [The influence of the type of fiber and the composition of the matrix on their adhesion in fiber concrete]. *Vestnik SibADI – Bulletin of SibADI*, 2022, vol. 19, no. 3 (85), pp. 436–445.

15. Zhavoronkov M. I., Pukharenko Yu. V., Pantelev D. A. *Rezultaty issledovaniya povedeniya stalefibrobeta pod nagruzkoy pri izgibe* [Results of the study of the behavior of steel fibre concrete under bending load]. *Ekonomika stroitel'stva – Economics of Construction*, 2024, no. 9, pp. 294–298.

16. Pukharenko Yu. V., Kostrikin M. P. *Stoykost' fibrobeta k vysokotemperaturnomu vozdeystviyu* [Resistance of fibro-beta to high-temperature exposure]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2020, no. 2 (88), pp. 96–106.