УДК 666.97.620.1

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-5-38-46

© В. А. Дорф, канд. техн. наук

© V. A. Dorf, PhD in Sci. Tech.

© Р. О. Красновский, канд. техн. наук,
ст. научн. сотрудник

© R. O. Krasnovskiy, PhD in Sci. Tech.,
senior research worker

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech.

(АО «Институт «Оргэнергострой»)

(JSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: dorfva@ioes.ru, krasnovskijro@ioes.ru,
kde90@bk.ru

E-mail: dorfva@ioes.ru, krasnovskijro@ioes.ru,
kde90@bk.ru

© П. С. Султыгова, канд. техн. наук, доцент
(Ингушский государственный университет)
E-mail: sultygova@yandex.ru

© P. S. Sultygova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Ingush State University)
E-mail: sultygova@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ И ЕЕ СОДЕРЖАНИЯ В СТАЛЕФИБРОБЕТОНЕ НА ЕГО ОГНЕСТОЙКОСТЬ

THE EFFECT OF THE PROPERTIES AND CONTENT OF STEEL FIBER IN STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE ON FIRE ENDURANCE

Рассматриваются результаты воздействия высоких температур при пожаре на изменение прочности при изгибе сталефибробетонных с высокопрочной цементно-песчаной матрицей при различных процентах армирования фиброй с различными геометрическими и прочностными характеристиками. Показано, что в диапазоне температур от 20 до 1100 °С прочность на растяжение при изгибе зависит от всех указанных характеристик фибры.

Ключевые слова: прочность на растяжение при изгибе, цементно-песчаная матрица, сталефибробетон, воздействие высоких температур, процент армирования по объему, вид фибры, диаметр фибры.

The article presents the results of study of the influence of high temperatures caused by the fire over the changes in bending strength of steel fiber reinforced concrete with high strength cement-sand matrix under various percent of reinforcement by fiber of various geometry and strength characteristics. It is demonstrated that within the temperature range from 20 to 1100 °C the tensile bending strength value depends on the all characteristics of fiber.

Keywords: tensile bending strength, cement-sand matrix, steel fiber reinforced concrete, effects of high temperatures, percent of reinforcement by the fiber volume, type and diameter.

АО «Институт «Оргэнергострой»» занимается исследованием сталефибробетонных применительно к несъемной сталефибробетонной опалубке в виде плоских элементов (листов) толщиной 20–30 мм [1, 2].

Несъемная опалубка из высокопрочного сталефибробетона выполняет функции ограждающих и несущих элементов железобетонных конструкций [3], влияя на их эксплуатационные характеристики, в том числе на прочностные характеристики сталефибробетона, которые изменяются под воздействием высоких температур при пожарах.

При изучении влияния температуры при пожаре конструкцию нагревают по стандартному режиму. Согласно ГОСТ 30247.0–94 [4] стан-

дартному (целлюлозному) режиму пожара при пределе огнестойкости R120 соответствует нагрев $T - T_0 = 1029$ °С в течение 120 мин со скоростью, описываемой зависимостью

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1),$$

где T — температура в печи, соответствующая времени t , °С; T_0 — температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С; t — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

В литературе изменение прочности сталефибробетона при пожаре объясняется несколькими одновременно проходящими в цементно-песчаной матрице и стальной фибре химическими и физико-химическими процессами, связанными с дегидратацией цементного камня и га-

зовой коррозией стали фибры. Интенсивность и результаты этих процессов зависят от действующей в данный момент времени температуры. Поэтому изменения, происходящие в матрице сталефибробетона (точнее, в цементном камне) и стальной фибре, рассматриваются для отдельных диапазонов температуры.

В диапазоне температуры от 20 до 110 °С:

- прочность сталефибробетона либо снижается до 65 % вследствие испарения кристаллизационной (гидратной) воды из пор цементного камня в результате уменьшения сил поверхностного натяжения в порах [9] с одновременной усадкой матрицы, либо возрастает на 2–7 % за счет дополнительной гидратации цементного камня [10, 11].

В диапазоне температуры от 200 до 300 °С:

- прочность сталефибробетонов либо снижается на 7–13 % [12], либо восстанавливается до начального значения [10] и даже повышается на 60 % [13];

- из минералов цементного камня удаляется содержащаяся в них кристаллизационная вода, что приводит к коррозии стали.

В диапазоне температуры от 300 до 400 °С:

- прочность снижается на 22 % за счет адсорбционного действия влаги воздуха при охлаждении после нагрева до нормальной температуры [11];

- из кристаллической решетки минералов удаляется конституционная вода (в виде ионов OH^- , H^+ , H_3O^+), что приводит к их разрушению с образованием микротрещин.

Температуру 550–600 °С можно считать границей структурной целостности матрицы на портландцементе [14].

В диапазоне температуры от 400 до 600 °С:

- прочность снижается на 43 % за счет трансформации кварца с увеличением его объема, а также из-за разницы коэффициентов температурного расширения цементного камня и заполнителя, в результате чего появляются видимые трещины с шириной раскрытия 0,5–1 мм [15];

- ускоряется процесс коррозии стали, а также ее охрупчивание за счет растворения азота в железе.

В диапазоне температуры от 600 до 750–800 °С:

- прочность снижается на 68 % в результате потери кристаллизационной воды, гашения сво-

бодной извести, расщепления доломита [10], что сопровождается растрескиванием поверхности сталефибробетона;

- исчезает влияние на прочность вида фибрового армирования в результате тепловой коррозии стали [14, 21].

При температуре 1000–1100 °С прочность сталефибробетона снижается до 90 %, при этом разрушаются и матрица, и фибра.

По данным разных исследователей, в общем случае по сравнению с обычным бетоном:

- огнестойкость не меняется при введении стальной фибры до 1 % [5];

- сталефибробетон при высоких температурах имеет большую прочность по сравнению с неармированным бетоном, так как фибра сдерживает трещинообразование [6–8, 23, 24];

- потеря прочности сталефибробетоном при нагреве зависит от температуры и продолжительности нагрева [5, 6, 8, 25]:

- потеря прочности незначительна при нагреве от 25 до 400 °С;

- прочность резко падает при нагреве от 400 до 600 °С.

Следует отметить, что приводимые в литературе результаты были, как правило, получены на сталефибробетонах с малым процентом фибрового армирования (не более 1,5 % по объему) [18] и при различном в каждом исследовании виде напряженного состояния (сжатие или растяжение). В то же время как наши исследования, так и исследования других авторов показали, что при нормальной температуре (20 ± 2) °С прочность сталефибробетона на сжатие относительно мало зависит от процента армирования, вида, диаметра и прочности волокон фибры [16], тогда как при изгибе эта зависимость весьма существенна [17].

Следует отметить, что в описанных в литературе исследованиях уделено недостаточно внимания влиянию на изменение прочности сталефибробетона при нагреве характера сцепления фибры с матрицей, которая определяется геометрией волокна фибры, наличием или отсутствием анкеров, формой (конструкцией) анкеров.

Учитывая результаты анализа литературных данных, нами было проведено исследование по оценке влияния характеристик фибры на изменение прочности сталефибробетона под воздей-

ствием высоких температур, возникающих при пожаре.

Поскольку исследования проводились для сталефибробетона несъемной опалубки, основное внимание было уделено прочности сталефибробетона на растяжение при изгибе. При этом для исключения влияния характеристик матрицы исследования были выполнены на сталефибробетонах, имевших один и тот же состав высокопрочной цементно-песчаной самоуплотняющейся матрицы (табл. 1).

Для исследования было выбрано пять видов фибры (рис. 1, табл. 2) из условия, что они позволяют попарно сравнивать прочности двух сталефибробетонов, у которых значения одного из параметров существенно различаются при близких значениях других. Например, волокна фибры Narex 32×1,2 и ФСЛ 40×0,8 различаются наличием и отсутствием анкера при близких значениях прочности стали, диаметра и длины волокна фибры.

Содержание фибры в матрице варьировали от нуля до шести процентов (по объему). Исключение составлял только сталефибробетон с фиброй ФСПА 30×0,3, так как при содержании этой фибры более 1,5 % волокна при перемешивании сталефибробетонной смеси сцеплялись друг с другом, образуя «ежи».

Исследования проводили на образцах в форме пластин длиной 260 мм и шириной 60 мм при толщине 20 ± 2 мм. Такие размеры образцов обеспечивали их равномерный прогрев. Каждая серия состояла не менее чем из трех образцов.

Результаты экспериментов приведены на рис. 2.

При нагреве в диапазоне температур от 20 до 200 °С прочность матрицы и сталефибробетонов повышалась на 12–56 % в зависимости от вида фибры и процента армирования, за исключением двух видов фибры — ФСПА 30×0,3 и ФСЛ 40×0,8.

Прочность сталефибробетона с фиброй ФСПА 30×0,3 монотонно снижалась, однако его прочность при нормальной температуре и при нагреве до 200 °С не менее чем в два раза превышала прочность сталефибробетонов с другими видами фибры (см. рис. 2, б, в) благодаря своему профилю, обеспечивающему хорошее сцепление фибры с матрицей при нормальной температуре [17]. Однако после нагрева до 200 °С прочность сталефибробетона с этой фиброй была не выше, чем с другими видами фибры.

Монотонное снижение прочности было также получено у сталефибробетона с фиброй ФСЛ 40×0,8 при армировании 6 % (см. рис. 2, д).

По-видимому, в обоих случаях полученный результат можно объяснить недостаточным сцеплением волокон фибры с матрицей вследствие микротрещинообразования.

Повышение прочности при нагреве, как показали ранее проведенные нами исследования [16], связано с возникновением в указанном диапазоне температуры пуццолановой реакции взаимодействия в присутствии влаги входящих в состав матрицы порошкообразных силикатов (микрокремнезем) с гидроксидом кальция (известью).

После нагрева до 400 °С прочность матрицы и сталефибробетонов снижалась, практически, до исходных значений, также, по-видимому, вследствие микротрещинообразования [11] и адсорбционного действия влаги воздуха при охлаждении после нагрева.

После нагрева до температуры от 400 до 800 °С, когда нарушается структурная целостность матрицы на портландцементе и кварцевом песке, в сталефибробетонах при армировании более 0,5 % у различных видов фибры начинают различаться значения получаемой после нагрева остаточной прочности (см. рис. 2, б–д). Особенно существенно этот эффект виден при армировании 3 % (рис. 2, г). Здесь можно выделить две группы сталефибробетона: первая — ста-

Таблица 1

Состав цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов

Расход на 1 м ³ , кг				
Цемент	Песок	Вода	Микрокремнезем	Гиперпластификатор Sika 5-800
800	1250	260	45	8

Рис. 1. Виды стальной фибры: а — ФСРВ 30×0,8; б — ФСРВ 15×0,3; в — ФСРА 30×0,3; з — Harex 32×1,2; д — ФСЛ 40×0,8

лефибробетоны с фиброй ФСРВ 15×0,3 и Harex 32×1,2, вторая — сталефибробетоны с фиброй ФСРВ 30×0,8 и ФСЛ 40×0,8. У сталефибробетонов первой группы значения остаточной прочности были в два раза выше, чем у второй.

Поскольку при одной и той же матрице сталефибробетоны различаются только характеристиками фибры, то различие в значениях остаточной прочности при изгибе можно объяснить только условиями сцепления волокон фибры с матрицей. Волокна фибры ФСРВ 30×0,8 и ФСЛ 40×0,8 не имеют анкеров, а по диаметру, длине и прочности достаточно близки между собой. Следовательно, сцепление с матрицей у них одинаковое. При армировании от 0 до 3 % вклю-

чительно волокна фибры до температуры 400 °С работают совместно с матрицей, существенно не изменяя ее прочность. Однако при армировании 3 % напряжения в них примерно в 1,5–2 раза выше, чем в матрице (см. рис. 2, з), это позволяет предположить, что в результате микротрещинообразования матрица частично выключается из работы, передавая часть усилий на фибру. В диапазоне температуры от 400 до 600 °С волокна начинают выдергиваться из матрицы, и усилия на них передаются только за счет сил трения, а в диапазоне от 600 до 800 °С к моменту выхода матрицы из работы все усилия передаются на волокна фибры (рис. 3, а–г).

Таблица 2

Характеристики фибр

Вид фибры	Характеристика фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению, МПа
ФСРВ 30×0,8	Рубленая из проволоки волнистая	30	0,8	860
ФСРВ 15×0,3		15	0,3	2450
ФСРА 30×0,3	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон	30	0,3	2650
Harex 32×1,2	Фрезерованная из слябов с анкерами по концам волокон	32	1,2	600
ФСЛ 40×0,8	Резанная из стального листа переменного профиля	40	0,8	580

Рис. 2. Зависимость от температуры прочности при изгибе матрицы и сталефибробетона с фиброй ФСПВ 15×0,3, ФСПА 30×0,3, ФСПВ 30×0,8, ФСЛ 40×0,8, Нareх 32×1,2 при содержании фибры по объему: а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

Сложнее объяснить работу сталефибробетонов с фибрами ФСПВ 15×0,3 и Нareх 32×1,2, поскольку эти виды фибры по всем своим геометрическим и прочностным характеристикам существенно отличаются друг от друга. Так, прямые волокна фибры Нareх 32×1,2 имеют на концах анкера (см. рис. 1, г), а волнистые волокна фибры ФСПВ 15×0,3 анкеров не имеют (см. рис. 1, а). Тем не менее, при армировании до

1,5 % включительно и нагреве до температуры 400 °С волокна фибры работают совместно с матрицей, существенно не изменяя ее прочность. В диапазоне температуры от 400 до 600 °С начинается постепенное выдергивание и выпрямление тонких волокон фибры ФСПВ 15×0,3 и обмятие бетона под кольцевыми анкерами волокон фибры Нareх 32×1,2, наподобие того как это имеет место в петлевых арматурных стыках Переде-

Рис. 3. Зависимость от температуры отношения R_{tfb}/R_{tfm} прочности при изгибе сталефибробетона с фиброй ФСПВ 15x0,3, ФСПВ 30x0,8, ФСПА 30x0,3, ФСЛ 40x0,8, Harex 32x1,2 к прочности матрицы при содержании фибры по объему: а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

рия [13]. В диапазоне же от 400 до 600 °C, как и у фибры ФСПВ 30x0,8 и ФСЛ 40x0,8, все усилия к моменту разрушения матрицы при 800 °C передаются на волокна фибры.

При армировании 6 % характер работ фибры несколько меняется (см. рис. 3, д). Так, в диапазоне от 20 до 600 °C в волокнах фибры ФСПВ

15x0,3 и Harex 32x1,2 напряжение примерно в 2–2,4 раза выше, чем в матрице. При этом характер работы фибры ФСПВ 30x0,8 в диапазоне температуры от 200 до 500 °C аналогичен работе фибр ФСПВ 15x0,3 и Harex 32x1,2, тогда как характер работы фибры ФСЛ 40x0,8 практически не меняется. Все это можно объяснить влиянием

конструкции армокаркасов, образуемых волокнами различных видов фибры при больших процентах армирования.

При достижении температуры 1100 °С и общей продолжительности нагрева 180 мин имело место практически полное разрушение сталефибробетонов на всех рассмотренных видах фибры и процентах армирования. Остаточная прочность при этом не превышала 5 МПа (см. рис. 3). Полученный результат свидетельствует о том, что в связи с разрушением матрицы, изготовленной на основе портландцемента и кварцевого песка, сталефибробетон не обеспечивает предела огнестойкости R120.

Повышение огнестойкости сталефибробетона на основе анализа литературных данных возможно за счет:

- применения высокопрочного шлакопортландцемента с повышенным содержанием шлака [27];
- замены кварцевого песка высокопрочным керамзитовым или песком из дробленого шлака или пеностекла [27];
- применения огнезащитных силиконовых, эпоксидных и акрилатных вспенивающихся покрытий [28], снижающих нагрев поверхности бетона до 600 °С при температуре окружающей среды 1100 °С, но существенно повышающих себестоимость конструкций;
- замены портландцемента глиноземистым цементом с учетом повышения при этом себестоимости сталефибробетона примерно в два раза.

Замена фибры из углеродистой стали фиброй из нержавеющей стали [29] или применение огнезащитных покрытий на волокна фибры из углеродистой стали имеет смысл только при замене портландцемента и кварцевого песка более огнестойкими материалами. Это подтверждается нашими экспериментами с двумя вариантами фибры ФСПВ 30×0.8 — без защитного покрытия и с защитным покрытием из оксида титана TiO_2 . Полученные результаты испытаний во всех диапазонах нагрева и при всех процентах армирования практически не отличались друг от друга.

Анализ результатов настоящего исследования позволяет сделать вывод о том, что при подборе состава сталефибробетона исходя из требований по огнестойкости необходимо учитывать как состав матрицы, так и вид применяемой фибры, а также проводить испытания на огнестойкость.

Библиографический список

1. Красновский Р. О., Дорф В. А. Перспективы возведения зданий и сооружений АЭС из армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой // Атомное строительство. 2013. № 15. С. 21–27.
2. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачёв К. В. Перспективы развития одного из направлений сборно-монолитного строительства при возведении жилых и общественных зданий // Архитектура и строительство России. 2012. № 12. С. 11–15.
3. Капустин Д. Е. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий конструктивный элемент железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 282 с.
4. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
5. СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013. Освоение подземного пространства конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ.
6. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete // Concrete Society Technical Report. 2007. № 63. P. 92.
7. Swamy R. N. Fiber Reinforced Cement and Concrete // Proceedings of the Fourth RILEM Internal Symposium. E & FN Spon. 1992.
8. Dhir R. K., McCarthy M. J. Concrete Durability and Repair Technology // Proceedings of the International Conference. University of Dundee, Scotland, UK, 8–10 September 1999. Thomas Telford Pub., 1999.
9. Михайлов В. В. Элементы теории структуры бетона, М.; Л.: Гос. изд. строит. лит., 1941.
10. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998.
11. Некрасов К. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
12. Nordström E. Durability of sprayed concrete — Steel fibre corrosion in cracks. Luleå University of Technology, Sweden, February 2005.
13. Tai Y.-S., Pan H.-H., Kung Y.-N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. No. 7. Pp. 2416–2424/
14. Demirel Bahar, Kelestemur Oguzhan. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume // Fire Safety Journal. 2010. № 45. Pp. 385–391.
15. Степанов В. Г., Степанюченко В. С. Обеспечение огнестойкости несущих железобетонных строительных конструкций // Конференция «Научное пространство Европы», раздел «Строительство

и архитектура», 2008. URL: www.rusnauka.com/10_NPE_2008/Stroitelstvo/29405.doc.htm

16. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П. С. Эффект пуццоланизации при высоких температурах высокопрочной цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 178–183.

17. Красновский Р. О., Рогачев К. В., Денисов А. В. Преимущество использования фибробетонов, армированных двумя типами фибр // Материалы I Междунар. (VII Всерос.) конф. НАСКР 2012. Чебоксары, 2012.

18. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2005. 42 с.

19. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Горбунов И. А. Влияние характеристик фибры на кубиковую и призмную прочность сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2013. № 6. С. 6–9.

20. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Горбунов И. А. Прочность сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей на растяжение при изгибе // Бетон и железобетон. 2014. № 2. С. 2–5.

21. Abrams M. S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F // Temperature and Concrete. ACI SP-25. Pp. 33–58 (Detroit, Michigan, 1971).

22. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачёв К. В., Туркин В. В. Влияние типа и содержания фибры на плотность сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей // Технологии бетонов. 2014. № 3. С. 30–32.

23. Spasojević Ana. Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design // THÈSE No 4051 (2008) (diss.). URL: http://infoscience.epfl.ch/record/116412/files/EPFL_TH4051.pdf

24. Yoshitake Isamu, Baba Koji, Ito Tetsuo, Nakagawa Koji. Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature.

25. Osama M. Ghazi. The Effect of Elevated Temperature of Compressive Strength of Steel Fiber Concrete // Engineering Sciences. 2013. Vol. 21. No. 3. Pp. 1006–1012.

26. СТО СРО-П 60542948 00035–2015. Проектирование железобетонных конструкций АЭС с петлевыми стыками стержневой арматуры.

27. Balázs G. L., Lublóy É. Reinforced concrete structures in and after fire // Concrete structures. 2012. Vol. 13. Pp. 72–80.

28. Гарустович И. В., Шишилов О. Н. Особенности применения огнезащитных вспучивающихся покрытий для объектов промышленного назначения. URL: www.o3-e.ru/innovations

29. ACI Committee 544. State of the art report on fiberreinforced concrete // A.C.I. Journal. Title No. 70-65, 729–744 (November 1973).

References

1. Krasnovskiy R. O., Dorf V. A. *Perspektivy vozvedeniya zdaniy i sooruzheniy AEhS iz armoblokov s nesemnoy stalefibrobetonnoy opalubkoy* [The prospects of construction of buildings and APS designs from reinforced concrete blocks with a fixed steel fiber reinforced concrete formwork]. *Atomnoe stroitel'stvo – Nuclear structure construction*, 2013, no. 15, pp. 21–27. Available at: <http://atomsro.ru/Magazine/22/#/38/>

2. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Rogachyov K. V. *Perspektivy razvitiya odnogo iz napravleniy sborno-monolitnogo stroitel'stva pri vozvedenii zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [The prospects of developing one of the directions of combined and monolithic construction at construction of residential and public buildings]. *Arkhitectura i stroitel'stvo Rossii – Architecture and construction of Russia*, 2012, no. 12, pp. 11–15.

3. Kapustin D. E. *Nesemnaya stalefibrobetonnoy opalubka kak nesushchiy konstruktivnyy ehlement zhelezobetonnykh konstruksiyzdaniy i sooruzheniy AEhS. Diss. kand. tekhn. nauk* [Fixed steel fiber reinforced concrete formwork as a bearing structural element of reinforced concrete designs of buildings and APS structures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2016, 282 p.

4. GOST 30247.0–94. *Konstruksii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestoykost'. Obshchie trebovaniya* [State Standart 30247.0-94. Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2003.

5. STO NOSTROY 2.27.125–2013. *Osvoenie podzemnogo prostranstva konstruksii transportnykh tonneley iz fibrobetona. Pravila proektirovaniya i proizvodstva rabot* [STO NOSTROY 2.27.125-2013. Development of underground space of transport tunnel designs from a fiber reinforced concrete. Rules for design and work implementation].

6. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. *Concrete Society Technical Report*, 2007, no. 63, p. 92.

7. Swamy R. N. Fiber Reinforced Cement and Concrete. *Proc. of the Fourth RILEM Internal Symposium, E & FN Spon.*, 1992.

8. Dhir R. K., McCarthy M. J. Concrete Durability and Repair Technology. *Proceedings of the International Conference*, University of Dundee, Scotland, UK, 8–10 September 1999, Thomas Telford Publ., 1999.

9. Mikhaylov V. V. *Ehlementy teorii struktury betona* [Elements of the theory of concrete structure]. Moscow, Leningrad, State Construction Literature Publ., 1941.

10. Milovanov A. F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsey pri pozhare* [Resistance of reinforced concrete designs at the fire]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1998.
11. Nekrasov K. D., Zhukov V. V., Gulyaeva V. F. *Tyazhelyy beton v usloviyakh povyshennykh temperature* [Heavy weight concrete in the conditions of high temperatures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 128 p.
12. Nordström E. *Durability of sprayed concrete. Steel fibre corrosion in cracks*. Luleå University of Technology Publ., Sweden, February 2005.
13. Tai Y.-S., Pan H.-H., Kung Y.-N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, no. 7, pp. 2416–2424.
14. Demirel Bahar, Kelestemur Oguzhan. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*, 2010, no. 45, pp. 385–391.
15. Stepanov V. G., Stepanyuchenko V. S. *Obespechenie ognestoykosti nesushchikh zhelezobetonnykh stroitel'nykh konstruktsey* [Ensuring fire resistance of the bearing reinforced concrete building constructions]. *Trudy konf. «Nauchnoe prostranstvo Evropy», razdel «Stroitel'stvo i arkhitektura»* [Proc. of the conf. "Scientific Space of Europe Conference", "Construction and Architecture" section], 2008. Available at: www.rusnauka.com/10_NPE_2008/Stroitelstvo/29405.doc.htm
16. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sulytsova P. S. *Ehffekt puttsolanizatsii pri vysokikh temperaturakh vysokoprochnoy tsementno-peschanoy matritsy stalefibrobetonov* [Pozzolanic effect at high temperatures of high strength cement-sand matrix of steel-fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 178–183.
17. Krasnovskiy R. O., Rogachev K. V., Denisov A. V. *Preimushchestvo ispol'zovaniya fibrobetonov, armirovannykh dvumya tipami fibr* [Advantage of using the fiber concrete reinforced with two types of fiber]. *Trudy I Mezhdunar. (VII Vseros.) konf. NASKR* [Proc. of the 1-st Int. conf. NADCR (VII All-Russia conf.)]. Cheboksary, 2012.
18. Pukharensko Yu. V. *Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svoystv fibrobetonov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and practical bases of forming the structure and properties of fiber reinforced concrete. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2005, 42 p.
19. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Gorbunov I. A. *Vliyanie kharakteristik fibry na kubikovuyu i prizmennuyu prochnost' stalefibrobetona s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of fiber properties on the cubical and prismatic durability of steel fiber reinforced concrete with a cement and sand matrix]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2013, no. 6, pp. 6–9.
20. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Gorbunov I. A. *Prochnost' stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey na rastyazhenie pri izgibe* [The strength of steel fiber reinforced concrete with a cement and sand matrix at bending tension]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2014, no. 2, pp. 2–5.
21. Abrams M. S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F. *Temperature and Concrete*. ACISP-25, 1971, pp. 33–58, Detroit, Michigan.
22. Dorf V. A., et al. *Vliyanie tipa i sodержaniya fibry na plotnost' stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of the type and content of fibrin on the density of steel fiber reinforced concrete with cement and sand matrix]. *Tekhnologii betonov – Technology of concrete*, 2014, no. 3, pp. 30–32.
23. Spasojević Ana. Structural implications of ultra-high performance fiber-reinforced concrete in bridge design. *THÈSE*, 2008, no 4051 (diss.). Available at: http://infoscience.epfl.ch/record/116412/files/EPFL_TH4051.pdf
24. Yoshitake Isamu, Baba Koji, Ito Tetsuo, Nakagawa Koji. *Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature*.
25. Osama M. Ghazi. The Effect of Elevated Temperature of Compressive Strength of Steel Fiber Concrete. *Engineering Sciences*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 1006–1012.
26. STO SRO-P 60542948 00035–2015. *Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsey AEhS s petlevymi stykami sterzhnevoy armatury*. [STO SRO-P 60542948 00035–2015. Design of reinforced concrete APS structures with loopback joints of rod fittings.]
27. Balázs G. L., Lublóy É. Reinforced concrete structures in and after fire. *Concrete structures*, 2012 vol. 13, pp. 72–80.
28. Garustovich I. V., Shishilov O. N. *Osobennosti primeneniya ognezashchitnykh vspuchivayushchikhsya pokrytiy dlya ob'ektov promyshlennogo naznacheniya* [Features of applying the fireproof bloating coverings for objects of industrial function]. Available at: www.o3-e.ru/innovations
29. ACI Committee 544. State of the art report on fiber reinforced concrete. *A.C.I. Journal*, November 1973, Title No. 70-65, pp. 729–744.