УДК 666.97.620.1

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-72-80

© В. А. Дорф, канд. техн. наук

© V. A. Dorf, PhD in Sci. Tech.

© Р. О. Красновский, канд. техн. наук, ст. науч. 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,

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

kde90@bk.ru

kde90@bk.ru

© П. С. Султыгова, канд. техн. наук, доцент

© P. S. Sultygova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Ингушский государственный университет)

(Ingush State University)

E-mail: sultygova@yandex.ru

E-mail: sultygova@yandex.ru

ОГНЕСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

FIRE ENDURANCE RATING OF HIGH-PERFORMANCE STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE (ANALYTICAL REVIEW)

Рассматриваются приведенные в литературе результаты исследований, касающихся воздействия температуры при пожаре на изменение прочностных характеристик сталефибробетонов в диапазонах изменения температуры от 200 до 400 °С и от 400 до 1200 °С. Показано существенное различие в изменении характеристик сталефибробетона в этих диапазонах, обусловленное различной степенью дегидратации цементного камня и заполнителей, а также температурной коррозии фибры.

Ключевые слова: цементно-песчаная матрица, сталефибробетон, воздействие высоких температур.

The article analyzes the results of investigations provided in the literature and related to the impact of temperature in fire condition on steel fiber reinforced concrete (SFRC) strength within the 200 to 400 °C and 400 to 1200 °C temperature ranges. A significant difference in changing of SFRC properties within the said ranges substantiated by different degree of dehydration of paste matrix and aggregates and of fiber temperature corrosion is demonstrated.

Keywords: cement-sand matrix, steel fiber reinforced concrete (SFRC), impact of high temperatures.

В последние годы разработка и применение сталефибробетона стремительно развиваются по сравнению с другими строительными материалами. Его высокие показатели по прочности, трещиностойкости и долговечности убедительно доказаны исследованиями, выполненными во многих странах мира.

В АО «Институт «Оргэнергострой»» проводятся исследования сталефибробетонов применительно к несъемной сталефибробетонной опалубке, используемой при возведении зданий и сооружений сборно-монолитным методом и представляющей собой плоские элементы (листы) толщиной 20–30 мм. В связи с этим возникла необходимость в оценке показателей эксплуатационной надежности сталефибробетона при пожаре. Анализ литературы показал, что, несмотря на значительное число работ, выполненных

в разных странах (США, Германии, Франции, Индии, Южной Кореи, Сингапуре, Малайзии, Тайване, Китае, Австралии, Румынии, Алжире, Греции, Ираке и др.), этот вопрос изучен недостаточно полно. В первую очередь это относится к сталефибробетонам с высокопрочной цементно-песчаной матрицей и с высокопрочной стальной фиброй, которые применяют в тонкостенных несущих конструкциях, работающих, главным образом, на растяжение и растяжение при изгибе.

На огнестойкость сталефибробетона, как и на другие его физико-механические и эксплуатационные характеристики, большое влияние оказывают состав и характеристики матрицы, вид и характеристики фибрового армирования, а также геометрические характеристики сталефибробетонных конструкций и режимы температурного воздействия.

Известно, что в железобетонных конструкциях из высокопрочного бетона, обладающего повышенной хрупкостью, при воздействии высоких температур происходит выкалывание бетона защитного слоя из-за температурного градиента и воздействия водяного пара, образующегося в теле бетона [1]. Фибровое армирование позволяет существенно снизить температурную деформацию конструкций.

Анализ приведенных исследований показал, что максимальные температуры, достигавшиеся в экспериментах, можно разделить на две группы: нагрев до температуры 200–400 °С и нагрев до температуры 600–1200 °С.

Практически во всех исследованиях образцы сталефибробетона нагревали в муфельной печи или газовой горелкой. Максимальные значения температуры, достигаемые в эксперименте, варьировали с шагом 100 или 150 °С. Скорость нагрева изменяли от 1,4 до 8 °С/мин (чаще всего 5 °С/мин). При стандартизированных испытаниях на огнестойкость по ГОСТ 30247.0 [2] и ASTM E 119-00a [8] применяют быстрый нагрев со скоростью 30 °С/мин.

После достижения заданной максимальной температуры образцы выдерживали в печи 1–4 ч (чаще всего 1 или 2 ч). После этого они, как правило, остывали в выключенной печи до начальной температуры 20–25 °С.

Исследования огнестойкости сталефибробетона проводили, как правило, на образцах в виде кубов или цилиндров с размером поперечного сечения 100 мм (реже 150 мм). Поскольку при температурных воздействиях распределение температуры по толщине испытываемых элементов существенно сказывается на стойкости материала к этому воздействию, то все приведенные в литературе результаты исследования нельзя напрямую применить к тонкостенной (толщиной 20–30 мм) сталефибробетонной несъемной опалубке.

Основные характеристики исследованных составов сталефибробетона приведены в табл. 1.

Матрицу сталефибробетона изготавливали на портландцементе, как правило, класса 52,5. В ряде составов (в основном, высокопрочных и порошковых) в матрицу добавляли тонкодисперсные активные минеральные добавки: микрокремнезем (МК), золу-унос (ЗУ), молотый

гранулированный шлак (МГШ) или молотый кварцевый песок (МКП).

В большинстве экспериментов использовали матрицу умеренной прочности при сжатии (40–60 МПа). В исследованиях, выполненных, как правило, после 2000 года, применяли особо высокопрочную матрицу с прочностью при сжатии 90–160 МПа. Соответственно, водоцементное или водовязующее отношение колебалось от 0,3–0,50 до 0,19–0,3.

Для матриц сталефибробетонов умеренной прочности применяли составы с крупным заполнителем диаметром до 20–40 мм, а для матриц особо высокопрочных сталефибробетонов — составы без крупного заполнителя. В порошковых составах применялся заполнитель крупностью до 0,6 мм.

Стальную фибру в составах с умеренной прочностью в основном применяли профилированную диаметром от 0,4 до 0,75 мм и длиной от 30 до 60 мм. В составах с особо высокопрочной матрицей фибра имела диаметр в основном 0,15–0,2 мм и длину от 9 до 15 мм.

В дополнение к стальной фибре в составы вводили полипропиленовую (реже полиэтиленовую) фибру диаметром 0,015–0,15 мм и длиной 6–13 мм.

Процент армирования стальной фиброй варьировался от 0,5 до 1,5 % (в отдельных случаях до 3 %). Полипропиленовая фибра вводилась в основном в количестве от 0,22 до 0,5 % (реже до 2 %).

При нагреве прочность сталефибробетона по сравнению с обычным бетоном при введении стальной фибры до 1 % не изменяется [28] и становится выше при содержании фибры больше 1,5 % [29].

Применение комбинированного армирования (сталь/полипропилен, полиэтилен) давало разнонаправленный эффект. При начальной прочности фибробетона 40 МПа нагрев до температуры 200 °С приводил к падению прочности до 15–20 МПа, а до температуры 400 °С — к ее росту до 60 МПа [10] или, наоборот, к незначительному снижению [13], тогда как в других случаях при всех соотношениях стальной и полипропиленовой фибры прочность фибробетона при нагреве до 200 и 400 °С почти не менялась [21].

Таблица 1

Составы сталефибробетона и их основные характеристики

Ис-точ-ник	Цемент	Минеральная добавка	Прочность матрицы при сжатии, МПа	В/Ц	Диаметр заполнителя, мм	Тип анкерования фибры	Диаметр фибры, мм	Длина фибры, мм	Объем фибры, %
[3]	CEM I	0	40–53	0,35–0,45	12,5–20	Крюк	0,55; 0,75	35; 60	0,5, 1,0
[4]	Не указан	0	31,1	0,47	>5	Крюк, волна	0,5; 0,5; 0,75	30 40 60	0,25–1,0
[5]	Не указан	0	166,6	Не указано	Не указан	Не указан	0,16/0,03*	13/13*	1/0* 0/1* 0,5/0,5*
[6]	Не указан	0	50–55	Не указано	Не указан	Анкер	0,7/0,022*	60/20*	1/0* 0/1* 0,5/0,5*
[7]	CEM I	МК + МКП	Свыше 150	0,19	0,6	Волна	0,175	12	1, 2 и 3
[10]	Не указан	МГШ	40	0,3	Св. 5	Анкер/волна*	0,5/0,6*	35/47*	1,2/0,3*
[11]	Не указан	Не указано	42,6	Не указано	Не указан	Профиль	0,9	60	0,5
[12]	CEM I 52,5N	0	39, 53, 99		Св. 5	Драмикс нерж.	0,4	25	1
[13]	CEM I	МК	Не указана	0,28	Не указан	Профиль	0,4/0,15*	25/12*	0,8/0,22*
[14]	Не указан	Не указано	63, 25	Не указано	Не указан	Не указан	0,4 0,4/не указан*	25 25/не указана*	1 1/0,22*
[18]	CEM I 52,5N	0	—	0,5	5	Не указан	0,25/0,018*	25/12*	0,58/ 0,58*
[19]	CEM I CEM I CEM I	0 0 МК + ЗУ	40 82 92	Не указано	40 8 8	Не указан	0,6/не указан*	30/30*	0,5/0,5*
[20]	CEM I	0	Не указана	0,47	10	Прямая Анкерная	0,4 0,5	24 30	0,5 или 1,0
[21]	Не указан	Не указано	46	Не указано	Не указан	Не указан	Не указан	Не указана	1,5/0* 1,12/1,38* 1,38/1,12* 0/1,5*
[22]	Не указан	Не указано	100	0,3	14	Волна	0,3	25	1,5
[23]	CEM 52,5	МК + МКП 40–60 %	Св. 120	0,20°0,26	0,5°5	Не указан	0,15/0,034 (0,015)**	6/ 9(6)**	2,4/2(2)**
[24]	Не указан	Не указано	Св.150	0,2	До 0,6	Не указан	0,22	13,2	1, 2, 3

* сталь/полипропилен

** сталь/полипропилен (полиэтилен)

Примечание.

МК — микрокремнезем, ЗУ — зола-унос, МГШ — молотый гранулированный шлак, МКП — молотый кварцевый песок.

Анализ проведенных исследований показывает, что в общем случае рост температуры нагрева приводит к снижению прочности сталефибробетона. Однако степень снижения прочности существенно зависит от максимальных температур, которые были достигнуты в эксперименте.

В случае умеренных температур (до 400 °C) снижение прочности сталефибробетона не только незначительно, но получен даже ее рост, что зависело от процента армирования, прочности матрицы, наличия анкеров у волокон фибры и вида фибры. Так, при стальной фибре диаметром 0,5–0,75 мм при фибровом армировании 0,25–1 % нагрев до 300 °C либо не приводил к снижению прочности сталефибробетона [4], либо незначительно ее снижал [1, 6, 19]. При нагреве до 400 °C наличие анкеров у волокон фибры практически не приводило к снижению прочности сталефибробетона, хотя прочность матрицы снижалась в 1,5 раза [3, 6]. Уменьшение процента армирования до 0,5 % приводило к снижению прочности сталефибробетона, но существенно меньшему, чем снижение прочности матрицы.

Применение фибры диаметром 0,9 мм привело к снижению прочности сталефибробетона на 15 % [11].

Рост прочности сталефибробетона от 4 до 20 % при нагреве до 150–300 °C был отмечен в [7, 16].

Поверхность стальных фибр при температуре 400 °C сохраняла исходный вид, и на ней были видны следы продуктов гидратации цемента.

Рост прочности сталефибробетона при нагреве до температуры 200–300 °C можно объяснить [7] ускорением пуццолановой активности микрокремнезема, увеличением объема продуктов гидратации и снижением за счет этого пористости. Это подтверждено фотографиями (рис. 1), сделанными на сканирующем электронном микроскопе с 1000–5000-кратным увеличением [7]. При температуре 200 °C микрокремнезем реагирует с продуктами гидратации цемента, а кварцевый порошок выполняет роль катализатора. Структура материала становится более плотной, чем исходная. При температуре 400 °C видна дегидратация гидросиликата кальция, изменение

Рис. 1. Поверхность волокон стальной фибры после температурных воздействий

формы кристаллов и появление пор. При этом также улучшается сцепление фибры с матрицей [20].

Результаты определения прочности сталефибробетонных при нагреве до 500–1200 °С приведены в табл. 2.

При нагреве более 500 °С имеет место снижение прочности пропорционально росту температуры [1]. Изменение прочности фибробетона после нагрева в процентах от начальной прочности (R_t/R_0 , %) в зависимости от температуры нагрева (T , °С) можно описать линейной аналитической зависимостью (рис. 2):

$$R_t / R_0 (\%) = 123 - 0,109T. \quad (1)$$

Зависимость (1) имеет высокий коэффициент корреляции, равный 0,98.

В [4] приводится линейная аналитическая зависимость прочности фибробетона после нагрева до температуры T (R_t , МПа) от начальной прочности R_0 , в которой, помимо температуры нагрева, учтены процент фибрового армирования (μ) и соотношение длины и диаметра фибры (l/d):

$$R_t = (((0,0008 l/d - 0,03)\mu - 0,113T) + 100)R_0. \quad (2)$$

По данным [4] эта зависимость показала приемлемую точность при обработке результатов экспериментов других авторов.

Снижение прочности сталефибробетона при сжатии при нагреве до 500 °С объясняется также расширением заполнителей и усадкой цементного камня, приводившими к развитию трещин [1, 9].

При температуре 550–600 °С начинаются трансформация и расширение кристаллической фазы, а также более интенсивное снижение прочности сталефибробетона при сжатии. На поверхности стальной фибры видны следы процесса ее окисления (см. рис. 1).

В сталефибробетонах с высокой влажностью в диапазоне температур 400–600 °С имеют место случаи взрывного разрушения с выкалыванием отдельных фрагментов. Такие значения температур достигаются через 15 мин нагрева [27] по стандартизованным режимам, применяемым при испытании железобетонных конструкций на огнестойкость [2, 8]. Взрывное

Таблица 2

Прочность сталефибробетона при нагреве до 500–1200 °С

Источник	Начальная прочность, МПа	Прочность сталефибробетона в % от начальной при температуре, °С					Примечание
		500	600	700	800	1000	
[4]	31,1	64	48	32	—	—	
[5]	170,1/155,8 ¹	—	—	0/25,5 ¹	—	—	
[6]	56,0/52,0 ¹	89/87 ¹	80/58 ¹	71/50 ¹	68,48 ¹	—	
[7]	Св. 60	70–80	62	50	20	—	Порошковый бетон
[10]	40	85 ²	70 ²	65 ²	60 ²	—	
[11]	51,2	<60	—	—	28	—	
[13]	Св. 60	—	65	—	—	—	
[14]		—	53–63	—	32–36	13–18	Фибра из нержавеющей стали
[15]		40	37	—	—	—	
[16]		91/95	—	—	—	—	
[20]		—	—	20–30	—	—	
[22]		78	56	—	—	—	
[24]		94	93	92	91	89	Сомнительные данные
Среднее		72	58	41	40	15	

¹ Стальная фибра 1 % / стальная и полипропиленовая фибра по 0,5 %.

² Стальная + полипропиленовая фибра 0,8–1,2/0,2–0,3 %.

разрушение объясняется давлением перегретого пара, образовавшегося в результате нагрева воды в порах матрицы. При температуре 400 °С и выше давление водяного пара превышает 10–20 МПа, что больше прочности сталефибробетона на растяжение. При испытании предварительно высушенных образцов взрывной характер разрушения не проявлялся [1].

Одним из распространенных способов борьбы с взрывным разрушением (выкалыванием) является введение 0,2–0,6 % полипропиленовой фибры. Однако обоснование этого явления не до конца ясно. В литературе часто эффект введения полипропиленовой фибры объясняют тем, что она плавится при температуре около 170 °С, а затем испаряется, образуя в сталефибробетоне каналы, через которые сбрасывается давление перегретого водяного пара. К сожалению, трудно представить, что 5–10 % по объему воды, имеющейся в цементной матрице, могут быстро выйти через извилистые каналы сечением в доли процента от площади образца.

При 700 °С термическое расширение приводит к образованию множества трещин, выходящих на поверхность образцов, и к дальнейшему существенному падению прочности сталефибробетона при сжатии.

При температуре 800 °С, как видно на фотографиях с электронного микроскопа [7], пластинчатая структура гидросиликатов превращается в гранулированную, напоминающую местами кораллы, часть компонентов плавится,

так что остаточная прочность сталефибробетона составляет не более 20 % от начальной. Происходит уменьшение сечения волокон стальной фибры и появление на них поперечных трещин (см. рис. 1).

При температуре 1000 °С и выше происходит деградация цементной матрицы и стальной фибры, что подтверждают микрофотографии в правой колонке на рис. 1. На поверхности стальных фибр четко видны (рис. 3) окислы, разрыхляющие металл и снижающие его прочность [20].

Как показал эксперимент [4], при нагреве прочность сталефибробетона на растяжение падает сильнее, чем при сжатии, что объясняется потерей сцепления фибры с матрицей при температурной деструкции последней.

Выводы

Анализ литературных данных показал, что огнестойкость сталефибробетона выше, чем у обычного бетона, особенно в области температур до 600 °С. При этом за счет наличия фибры исключается эффект взрывного разрушения при повышенных температурах.

При температуре 1000 °С и выше происходит как деградация цементной матрицы, так и температурная коррозия стальной фибры. Поэтому для повышения огнестойкости сталефибробетона при температурах выше 800 °С необходимо, в первую очередь, менять химико-минералогический состав матрицы и увеличивать диаметр волокон фибры или изменять вид стали.

Рис. 2. Зависимость относительной прочности бетона от температуры нагрева

Рис. 3. Поверхность стальной фибры после воздействия температуры 1000 °C

Хотя тонкостенные конструкции, работающие на растяжение при изгибе, целесообразно изготавливать из высокопрочного сталефибробетона, основные исследования влияния температуры нагрева на прочность сталефибробетона были выполнены при сжатии и, в основном, в диапазоне прочности до 60 МПа. При этом одновременно указывается, что степень падения прочности при нагреве зависит от вида напряженного состояния.

В исследованиях, посвященных влиянию нагрева на механические характеристики сталефибробетона, мало внимания уделялось влиянию вида фибры и ее содержания на огнестойкость.

Библиографический список

1. Пушенко А. С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2008. 217 с.
2. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
3. Deepthy S. Nair. Performance of steel fiber reinforced concrete under elevated temperature // *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2016. May-Jun. Vol. 13, Issue 3, Ver. II. Pp. 13–17.
4. Jihwan Kim, Gyu Pil Lee, Do Young Moon. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 182–191.
5. Ming-Xiang Xiong, J. Y. Richard Liew. Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced ultra-high performance concrete after exposure to high temperatures // *Materials and Constructions*. 2015. October–December. Vol. 65, Issue 320.
6. Clotilda Petrus, Huurun Ain Azharb, Goh Lyn Deea, Ruqayyah Ismaila, Anizahyati Alisibramulisi. Compressive strength of concrete with fibres at elevated temperature // *Journal Technology (Sciences & Engineering)*. 2016. 78:5–4. Pp. 71–74.
7. Yuh-Shiou Tai, Huang-Hsing Pan, Ying-Nien Kung. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. 241(7), 2416.
8. ASTM E 119-00a. Standard test methods for fire tests of building construction and materials.
9. Cheyrezy M., Maret V., Frouin L. Microstructural analysis of RPC // *Cement and Concrete Research*. 1995. 25 (7). Pp. 1491–1500.
10. Vikram J., Sekar S. K. Enhancement of concrete sustainability under temperature variation using hybrid fibre reinforcement // *Indian Journal of Science and Technology*. 2015. October. Vol. 8 (28).
11. Shaikh F. U. A., Tawee M. Compressive strength and failure behavior of fibre reinforced concrete at elevated temperatures // *Advances in Concrete Construction*. 2015. Vol. 3, No. 4. Pp. 283–293.
12. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.
13. Oana E. Cazan, Marius C. Gherman, Roxana P. Boldor, Tudor M. Brata. Hybrid Fiber Reinforced HPC at Elevated Temperatures // *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*. 2014. Vol. 57, No. 2. Pp. 197–202.
14. Alan Lau. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers. M. Phil. The Hong Kong Polytechnic University, 2003.
15. Gauri Kadam, V. S. Shingade. Compressive behavior of steel and PP fibers in HPC subjected to high temperature // *IJARIE-ISSN(O)-2395-4396*. 2016. Vol. 2, Issue 4. Pp. 340–353.
16. P. Jyotsna Devi, Dr. K. Srinivasa Rao. A study on the flexural and split tensile strengths of steel fibre reinforced concrete at high temperatures // *IJEAR*. 2014. Jan – June. Vol. 4, Issue Spl-2. Pp. 49–53.
17. Sofren Leo Suhaendi, Takashi Horiguchi. Fiber-reinforced high-strength concrete under elevated temperature – effect of fibers on residual properties // *Fire safety science – Proceedings of the eighth international symposium*. 2005. Pp. 271–278.
18. Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Tahar Kadri, Raoul Jauberthi. Properties of fibre mortars after exposure to high temperatures // *Gradevinar*. 2014. Vol. 5. No. 66. Pp. 425–431.

19. Sideris K. K., Manita P., Papageorgiou A., Chaniotakis E. Mechanical Characteristics of High Performance Fibre Reinforced Concretes at Elevated Temperatures // ACI Special Publication. 2003. 06.01. Vol. 212. Pp. 973–988.

20. Wasan I. Khalil. Influence of high temperature on steel fiber reinforced concrete // Journal of Engineering and Development. 2006. June. Vol. 10, No. 2. Pp. 139–150.

21. Aminuddin Jamerana, Izni S. Ibrahima, Siti Hamizah S. Yazana, Siti Nor A. A. Rahim. Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature // The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125, 2015. Pp. 818–824.

22. Muna Mohammed Karim. Effect of fire flame exposure on some properties of fiber reinforced high strength concrete // Journal of Babylon University. Pure and Applied Sciences. 2011. Vol. 19. No. 3. Pp. 1184–1197.

23. Saravanja M., Klingsch W., Anders S. Effects of different fibre materials and quantities of high temperature strength and explosive spalling of UHPC concrete // 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure. October 2011. Pp. 5–8.

24. Wenzhong Zheng, Baifu Luo, Ying Wang. Stress – strain relationship of steel-fibre reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures // Materials and Structures. 2015. Vol. 48. Pp. 2299–2314.

25. EN 1944-1-2 Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.

26. ACI 216R–89 (Reapproved 1994). Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements.

27. Степанов В. Г., Степанюченко В. С. Обеспечение огнестойкости железобетонных строительных конструкций // Строительство и архитектура. 2008.

28. СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013. Освоение подземного пространства конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ.

29. Swamy R. N. Fiber Reinforced Cement and Concrete // Proceedings of the Fourth RILEM Internal Symposium. London; New York: E & FN Spon, 1992.

References

1. Pushenko A. S. *Vysokoprochnyy beton v usloviyakh vozdeystviya vysokikh temperatur pri pozhare*. Diss. kand. tekhn. nauk [High-strength concrete in the conditions of high temperatures impact at fire. PhD in Sci. Tech. diss.]. Rostov-on-Don, 2008, 217 p.

2. GOST 30247.0–94. *Konstruktsii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestoykost'*. Obshchie trebovaniya [GOST

30247.0–94. Construction designs. Techniques of testing of fire resistance. General requirements].

3. Deepthy S. Nair. Performance of steel fiber reinforced concrete under elevated temperature. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2016, May-Jun., vol. 13, iss. 3, ver. II, pp. 13–17.

4. Jihwan Kim, GyuPil Lee, Do Young Moon. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 79, pp. 182–191.

5. Ming-Xiang Xiong, J. Y. Richard Liew. Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced ultra-high performance concrete after exposure to high temperatures. *Materials and Constructions*, 2015, Oct.–Dec., vol. 65, iss. 320.

6. Clotilda Petrus, et al. Compressive strength of concrete with fibres at elevated temperature. *Journal Technology (Sciences & Engineering)*, 2016, 78:5–4, pp. 71–74.

7. Yuh-Shiou Tai, Huang-Hsing Pan, Ying-Nien Kung. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(7), 2416.

8. ASTM E 119-00a. Standard test methods for fire tests of building construction and materials.

9. Cheyrey M., Maret V., Frouin L. Microstructural analysis of RPC. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25 (7), pp. 1491–1500.

10. Vikram J., Sekar S. K. Enhancement of concrete sustainability under temperature variation using hybrid fibre reinforcement. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, Oct., vol. 8 (28).

11. Shaikh F. U. A., Tawee M. Compressive strength and failure behavior of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Advances in Concrete Construction*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 283–293.

12. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.

13. Oana E. Cazan, Marius C. Gherman, Roxana P. Boldor, Tudor M. Brata. Hybrid Fiber Reinforced HPC at Elevated Temperatures. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 2014, vol. 57, no. 2, pp. 197–202.

14. Alan Lau. *Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers*. M. Phil. Hong Kong Polytechnic University Publ., 2003.

15. Gauri Kadam, V. S. Shingade. Compressive behavior of steel and PP fibers in HPC subjected to high temperature. *IJARIIIE-ISSN(O)-2395-4396*, 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 340–353.

16. P. Jyotsna Devi, Dr. K. Srinivasa Rao. A study on the flexural and split tensile strengths of steel fibre

reinforced concrete at high temperatures. *IJEAR*, 2014, Jan – Jun., vol. 4, iss. Spl-2, pp. 49–53.

17. Sofren Leo Suhaendi, Takashi Horiguchi. *Fiber-reinforced high-strength concrete under elevated temperature–effect of fibers on residual properties*. Proc. of the VIII International symposium "Fire safety science", 2005, pp. 271–278.

18. Mohammed Ezziane, Laurent Molez, TaharKadri, Raoul Jauberthi. Properties of fibre mortars after exposure to high temperatures. *Grādevinar*, 2014, vol. 5.66, pp. 425–431.

19. Sideris K. K., Manita P., Papageorgiou A., Chaniotakis E. Mechanical Characteristics of High Performance Fibre Reinforced Concretes at Elevated Temperatures. *ACI Special Publication*, 2003.06.01, vol. 212, pp. 973–988.

20. Wasan I. Khalil. Influence of high temperature on steel fiber reinforced concrete. *Journal of Engineering and Development*, 2006, Jun., vol. 10, no. 2, pp. 139–150.

21. Aminuddin Jamerana, et al. *Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature*. Proc. of the 5th International Conf. of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125, 2015, pp. 818–824.

22. Muna Mohammed Karim. Effect of fire flame exposure on some properties of fiber reinforced high strength concrete. *Journal of Babylon University, Pure and Applied Sciences*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 1184–1197.

23. Saravanja M., Klingsch W., Anders S. *Effects of different fibre materials and quantities of high temperature strength and explosive spalling of UHPC concrete*. Proc. of the 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, October 2011, pp. 5–8.

24. Wenzhong Zheng, Baifu Luo, Ying Wang. Stress – strain relationship of steel-fibre reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 2015, vol. 48, pp. 2299–2314.

25. EN 1944-1-2 Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design.

26. ACI 216R–89 (Reapproved 1994). Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements.

27. Stepanov V. G., Stepanyuchenko V. S. *Obespechenie ognestoykosti zhelezobetonnykh stroitel'nykh konstruktsey* [Providing fire resistance to reinforced concrete designs]. *Stroitelstvo i arkhitektura – Construction and Architecture*, 2008.

28. STONOSTROY 2.27.125–2013. *Osvoenie podzemnogo prostranstva konstruktsey transportnykh tonneley iz fibrobetona. Pravila proektirovaniya i proizvodstva rabot* [STONOSTROY 2.27.125-2013. Development of underground space of transport tunnels design from fiber reinforced concrete. Rules of design and works production].

29. Swamy R. N. *Fiber Reinforced Cement and Concrete*. Proc. of the 4th RILEM Internal Symposium. London; New York: E & FN Spon, 1992.