О ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПОСЛЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

ШУБИН И. Л.¹, ДОРФ В. А.², КРАСНОВСКИЙ Р.О.²,
КАПУСТИН Д. Е.³, СУЛТЫГОВА П.С.⁴

¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

²АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

⁴Ингушский государственный университет, г. Магас, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования прочности при изгибе сталефибробетонных образцов (СФБ) после воздействия высоких температур. Рассмотрены свойства СФБ на основе высокопрочной цементно-песчаной матрицы при армировании пятью различными видами фибры. Процент содержания каждого вида фибры по объему составлял от 0,5 до 6,0%. Все виды фибры имели различные прочностные и геометрические характеристики. Результаты исследований показали, что прочность на растяжение при изгибе образцов СФБ, в диапазоне воздействия температур от 20 до 1100 °С, зависит от объемного содержания фибры и ее прочностных и геометрических характеристик. Практически полное разрушение СФБ наблюдалось при достижении температуры 1100°С для всех рассматриваемых видов фибры и при всех процентах армирования. Остаточная прочность при такой температуре не превышала 5МПа.

Ключевые слова: температурное воздействие, сталефибробетон, различный вид фибры

THE CHARACTER OF CHANGE OF PROPERTIES OF STEEL FIBRE CONCRETE AFTER TEMPERATURE EXPOSURE

SHUBIN I.L.¹, DORF V.A.², KRASNOVSKIY R.O.², KAPUSTIN D.E.³, SULTYGOVA P.S.⁴

¹Research institute of construction physics of RAACS (NIISF RAASN), Moscow, Russia

²JSC "Institute "Orgenergostroy", Moscow, Russia

³Moscow State National Research University of Civil Engineering, Moscow, Russia

⁴Ingush State University, Magas, Russia

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the bending strength of steel-fiber-concrete (SFC) samples after exposure to high temperatures. The properties of SFC based on high-strength cement-sand matrix with reinforcement of five different types of fibers are considered. The percentage of the content of each type of fiber by volume ranged from 0.5 to 6.0%. All types of fibers had different strength and geometric characteristics. The research results showed that the tensile strength in bending of SFC specimens, in the range of exposure to temperatures from 20 to 1100 °C, depends on the volume content of the fiber and its strength and geometric characteristics. Almost complete destruction of the SFC was observed at a temperature of 1100 °C for all types of fiber under consideration and at all percentages of reinforcement. The residual strength at this temperature did not exceed 5 MPa.

Keywords: temperature exposure, steel fiber concrete, different type of fiber

Изменение прочностных характеристик сталефибробетона (СФБ) при пожаре можно объяснить физико-механическими и химическими процессами, которые одновременно происходят в цементно-песчаной матрице и стальной фибре. Связаны они с дегидратацией це-

ментного камня, а также с газовой коррозией стали фибры. Действующая в данный момент времени на СФБ температура определяет интенсивность и результат таких процессов.

Рассмотрим изменения, происходящие в цементном камне (матрице) и стальной фибре в различных диапазонах температурного воздействия. Можно отметить, что наблюдаемое в диапазоне температур 20-100 °С снижение прочности бетона является результатом испарения кристаллизационной (гидратной) воды из пор цементного камня вследствие уменьшения сил поверхностного натяжения в порах, с одновременной усадкой матрицы или же, происходит возрастание прочности за счет дополнительной гидратации цементного камня [1,2].

Для температуры от 200 до 300 °С из минералов цементного камня удаляется кристаллизационная вода, что способствует коррозии стали. Прочность СФБ может снизиться на 7-13%, или восстановиться до первоначального значения, либо повышается на 60% [1,3-4].

При воздействии температур от 300 до 400 °С прочность бетона снижается на 22% за счет адсорбционного действия влаги воздуха при охлаждении после нагрева до нормальной температуры [2]. Из кристаллической решетки минералов происходит удаление конституционной воды, что приводит к образованию микротрещин и разрушению.

Диапазону температур от 400 до 600 °С присуще снижению прочности до 43% вследствие трансформации кварца с увеличением его объема, а также из-за разницы коэффициентов температурного расширения цементного камня и заполнителя, за счет чего появляются трещины с шириной раскрытия 0,5-1 мм [5]. Также в данном диапазоне температур ускоряется процесс коррозии стали и повышается ее хрупкость за счет растворения азота в железе.

Границей структурной целостности матрицы на портландцементе можно считать температуру от 550 до 600 °С [6].

Диапазон температур от 600 до 800 °С снижает прочность на 68% за счет потери кристаллизационной воды, гашения свободной извести, расщепления доломита [1], что приводит к растрескиванию поверхности СФБ. В результате тепловой коррозии стали исчезает влияние на прочность вида фибрового армирования [6,7].

Температура от 1000 до 1100 °С приводит к снижению прочности СФБ до 90%, при этом происходит разрушение как матрицы, так и фибры.

По сравнению с неармированным бетоном фибробетон обладает более высокой прочностью, водонепроницаемостью, огнестойкостью. Для снижения возрастающей (с увеличением прочности) хрупкости, в бетон обычно добавляют стальные волокна, так как фибра способствует сдерживанию трещинообразования [8-12]. Стальная фибра повышает вязкость разрушения. Указанные свойства способствуют применению фибробетона в таких конструкциях, как защитные оболочки атомных электростанций, мосты, тоннели, высотные и сверхвысотные здания.

При нагреве СФБ теряет свою прочность в зависимости от температуры и продолжительности температурного воздействия [8,10,13]. Обычно потеря прочности невелика при нагреве 25-400 °С и резко снижается при нагреве от 400 до 600 °С.

При нормальной температуре (20±2) °С для СФБ прочность на сжатие обычно мало зависит от процента армирования, прочности и геометрии волокон самой фибры [14], а при изгибе эта зависимость весьма существенна [15].

Экспериментальная часть.

Нами были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния характеристик фибры на прочность СФБ на растяжение при изгибе при высоком температурном воздействии, соответствующем пожару. Исследования проведены с использованием пяти разных видов фибры, но при этом СФБ имел один и тот же состав высокопрочной самоуплотняющейся цементно-песчаной матрицы. Матрица состояла из следующих компонентов: 800 кг/м³ цемента; 1250 кг/м³ песка; 260 кг/м³ воды; 45 кг/м³ микрокремнезема и 8 кг/м³ гиперпластификатора Sika5-800. Виды стальной фибры и их характеристики представлены в табл. 1 и рис.1.

Рисунок 1. Виды стальных фибр:

а). ФСПВ 30×0,8; б). ФСПВ 15×0,3; в). ФСПА 30×0,3; г). Harex 32×1,2; д). ФСЛ 40×0,8

Таблица 1 - Характеристики стальных фибр

	Вид фибры	Характеристика фибры	
		Длина волокон/ диаметр волокон, мм	Нормативное со- противление растя- жению, МПа
а).	Рубленая из проволоки волнистая (ФСПВ 30×0,8)	30/0,8	860
б).	Рубленая из проволоки волнистая (ФСПВ 15×0,3)	15/0,3	2450
в).	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон (ФСПА 30×0,3)	30/0,3	2650
г).	Фрезерованная из слябов с анкерами по концам волокон (Harex 32×1,2)	32/1,2	600
д).	Резанная из стального листа переменного профиля (ФСЛ 40×0,8)	40/0,8	580

Экспериментальные исследования проводили на образцах-пластинах размером 260×60×20 (высота h) мм с содержанием фибры по объему 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 и 6,0%, и сравнивались с результатами по матрице (содержание фибры 0,0%). Исключение составлял СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3, так как при ее содержании более 1,5%, при перемешивании сталефибробетонной смеси волокна сцеплялись друг с другом. В каждой серии было по три образца и испытания проводили в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 [16]. Для изучения влияния температуры конструкцию нагревают по стандартному (целлюлозному) режиму пожара. Пределу огнестойкости R120 соответствует нагрев $T - T_0 = 1029^\circ\text{C}$ в течение 120 минут со скоростью соответствующей зависимости

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

где T_0 - температура в печи до начала теплового воздействия (равна температуре окружающей среды), $^\circ\text{C}$;

T - температура в печи, соответствующая времени t , $^\circ\text{C}$;

t - время, исчисляемое от начала испытания, мин.

По результатам экспериментальных исследований построены графики зависимости прочности матрицы и СФБ от температуры (рис.2). Нагрев от 20 до 200 $^\circ\text{C}$ привел к повышению прочности матрицы и СФБ от 12 до 56% в зависимости от вида фибры и процента армирования. Исключение для данного интервала температур составил СФБ с двумя видами фибры: ФСПА 30×0,3 и ФСЛ 40×0,8. Наблюдалось монотонное снижение прочности СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3, но при этом необходимо отметить, что благодаря своему профилю, обеспечивающему хорошее сцепление фибры с матрицей при нормальных условиях, его прочность при температуре 20 $^\circ\text{C}$ почти в два раза превышала прочность СФБ с другими видами фибры (рис. 2, б, в) [15]. При этом после нагрева до 200 $^\circ\text{C}$ прочность СФБ с такой фиброй уже была порядка прочности СФБ с другими видами фибры.

Для СФБ с фиброй ФСЛ 40×0,8 также наблюдалось монотонное снижение прочности бетона при 6-ти процентном армировании (рис. 2, д). Полученный результат для этих случаев можно объяснить ослаблением сцепления волокон фибры с матрицей вследствие микро-трещинообразования.

Процесс повышения прочности СФБ при нагреве связан с возникновением в приведенном диапазоне температуры пуццолановой реакции взаимодействия в присутствии влаги, входящих в состав матрицы, порошкообразных силикатов (микрокремнезём) с гидроксидом кальция (известью).

Нагрев до 400°C привел к снижению прочности СФБ и матрицы почти до исходных величин в связи с микротрещинообразованием и адсорбционным действием влаги воздуха при охлаждении после нагрева.

Температурное воздействие от 400 до 800°C приводит к нарушению структурной целостности матрицы на портландцементе и кварцевом песке, а в СФБ при армировании свыше 0,5% для различных видов фибры проявляются значения получаемой после нагрева остаточной прочности (рис.2, б-д). Явно этот эффект заметен при армировании 3% (рис.2, г). Разделим рассматриваемый СФБ на две группы. Первая группа - СФБ с фиброй ФСПВ 15×0,3 и Narex 32×1,2, а вторая - это СФБ с фиброй ФСПВ 30×0,8 и ФСЛ 40×0,8. Для СФБ первой группы величина остаточной прочности была в два раза больше, чем у второй.

Все исследованные образцы СФБ имеют одинаковую матрицу, но разную фибру, поэтому различие в значениях остаточной прочности при изгибе можно объяснить условиями сцепления волокон фибры с матрицей. Схожее сцепление с матрицей имеют волокна фибры ФСПВ 30×0,8 и ФСЛ 40×0,8, так как у них нет анкеров, а по диаметру, длине и прочности они имеют близкие между собой значения. Для этих СФБ при армировании от 0 до 3% включительно наблюдаем, что до температуры 400°C волокна фибры работают совместно с матрицей, существенно не меняя ее прочность, но при более высоком проценте армирования напряжения в них будут в 1,5 - 2,0 раза выше, чем в матрице (рис.2, г, д). Будем считать, что в результате микротрещинообразования матрица частично выключается из работы, передавая часть усилий на фибру.

СФБ с фиброй ФСПВ 30×0,8 был испытан для двух вариантов - с фиброй без защитного покрытия и с защитным покрытием (ФСПВ-П 30×0,8) из оксида титана TiO₂. При этом для всех диапазонов нагрева и при всех процентах армирования полученные результаты практически не отличались друг от друга (рис.2).

После нагрева СФБ от 400 до 600°C волокна фибры выдергивались из матрицы. В диапазоне температур 600-800 °C наблюдается выход матрицы из строя, и все усилия передаются на волокна фибры (рис.3).

Остановимся на работе СФБ с фибрами ФСПВ 15×0,3 и Narex 32×1,2. Они существенно отличаются друг от друга по своим геометрическим и прочностным характеристикам. Волнистые волокна фибры ФСПВ 15×0,3 не имеют анкеров, а прямые волокна фибры Narex 32×1,2 их имеют. Однако при армировании до 1,5% включительно и нагреве до 400°C волокна фибры работают совместно с матрицей, значительно не меняя ее прочность. При температурах нагрева от 400 до 600 °C наблюдается постепенное выдергивание и выпрямление тонких волокон фибры ФСПВ 15×0,3, а также обмятие бетона под кольцевыми анкерами волокон фибры Narex 32×1,2. При 800°C все усилия к моменту разрушения матрицы передаются на волокна фибры.

Характер работы фибры изменяется при увеличении процента армирования до 6%. В диапазоне температур от 20 до 600°C в волокнах фибры ФСПВ 15×0,3 и Narex 32×1,2 напряжения в 2-2,4 раза выше, чем в матрице. А в диапазоне температур от 200 до 500°C характер работы этих двух видов фибры аналогичен характеру работы фибры ФСПВ 30×0,8, а характер работы фибры ФСЛ 40×0,8 практически здесь не меняется. Такие закономерности можно объяснить влиянием конструкции армокаркасов, образуемых волокнами разных видов фибры при больших процентах армирования.

Рисунок 2 - Зависимость прочности матрицы СФБ с фиброй ФСПВ 15x0,3; ФСПА 30x0,3; ФСПВ 30x0,8; ФСЛ 40x0,8 и Нarex 32x1,2 от температуры и содержания фибры по объему: а) $\mu_{fv} = 0.5\%$; б) $\mu_{fv} = 1.0\%$; в) $\mu_{fv} = 1.5\%$; г) $\mu_{fv} = 3.0\%$; д) $\mu_{fv} = 6.0\%$

*Рисунок 3 - Характер разрушения образцов СФБ после температурного воздействия:
а) при $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) при $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$*

Практически полное разрушение СФБ наблюдалось при достижении температуры 1100°C для всех рассматриваемых видов фибры и при всех процентах армирования. Остаточная прочность при такой температуре не превышала 5МПа.

Вывод

Изучено воздействие высоких температур при пожаре на изменение прочности при изгибе СФБ с высокопрочной цементно-песчаной матрицей при различных процентах армирования фиброй разного вида, диаметра и прочности.

Установлено, что в диапазоне температур от 20 до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ прочность СФБ на растяжение при изгибе зависит от всех перечисленных характеристик фибры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998.
2. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
3. Nordström E. Durability of sprayed Concrete - Steel fibre corrosion in cracks. Sweden, Lulea: Lulea University of Technology.
4. 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. №7. Pp.2416-2424.
5. 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
6. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F // Temperature and Concrete. 1971. 25. Pp. 33-58.
7. 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.
8. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. Concrete Society Technical Report. 2007. №63. Pp.92.
9. Yoshitake Isamu, Baba Koji, Ito Tetsuo, Nakagawa Koji. Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature. URL: www.rilem.net
10. 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.
11. 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.
12. Swamy R.N. Fiber Reinforced Cement and Concrete // Proceedings of the Fourth RILEM Internal Symposium. E & FN Spon. 1992.
13. 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
14. 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. СПбГАСУ. 2017. №2(61). С.178-183.

15. Красновский Р.О., Рогачев К.В., Денисов А.В. Преимущество использования фибробетонов, армированных двумя типами фибр // Материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции НАСКР 2012. Чебоксары, 2012.

16. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования

REFERENCES

1. Milovanov A.F. Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsey pri pozhare [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998.

2. Nekrasov K.D., Zhukov V.V., Gulyayeva V.F. Tyazhelyy beton v usloviyakh povyshennykh temperatur [Heavy concrete at elevated temperatures]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 128 p.

3. Nordström E. Durability of sprayed Concrete - Steel fibre corrosion in cracks. Sweden, Lulea: Lulea University of Technology.

4. 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.

5. Stepanov V.G., Stepanyuchenko V.S. Obespecheniye ognestoykosti nesushchikh zhelezobetonnykh stroitel'nykh konstruktsey [Ensuring fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures]. Konferentsiya "Nauchnoye prostranstvo Yevropy", razdel "Stroitel'stvo i arkhitektura" [Conference "Scientific Space of Europe", section "Construction and Architecture"]. 2008. URL: www.rusnauka.com/10_NPE_2008/Stroitelstvo/29405.doc.htm

6. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F. *Temperature and Concrete*. 1971. 25. Pp. 33-58.

7. 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.

8. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. Concrete Society Technical Report. 2007. No 63. Pp. 92.

9. Yoshitake Isamu, Baba Koji, Ito Tetsuo, Nakagawa Koji. Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature. URL: www.rilem.net

10. 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.

11. 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.

12. Swamy R.N. Fiber Reinforced Cement and Concrete. Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium. E & FN Spon. 1992.

13. 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

14. Dorf V.A., Krasnovskiy R.O., Kapustin D.Ye., Sulygova P.S. Effekt puttsolanizatsii pri vysokikh temperaturakh vysokoprochnoy tsementno-peschanoy matritsy stalefibrobetonov [The effect of pozzolanization at high temperatures of high-strength cement-sand matrix of steel fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No 2 (61). Pp.178-183.

15. Krasnovskiy R.O., Rogachev K.V., Denisov A.V. Preimushchestvo ispol'zovaniya fibrobetonov, armirovannykh dvumya tipami fibr [The advantage of using fiber-reinforced concrete reinforced with two types of fibers]. Materialy I Mezhdunarodnoy (VII Vserossiyskoy) konferentsii NASKR 2012 [Materials of the 1st International (VII All-Russian) NASKR Conference 2012]. Cheboksary, 2012.

16. Russian standard GOST 30247.0-94 Konstruktsii stroitel'nyye. Metody ispytaniy na ognestoykost'. Obshchiye trebovaniya [Building constructions. Test methods for fire resistance. General requirements].

Информация об авторах:

Шубин Игорь Любимович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия
Доктор технических наук,
Директор НИИСФ РААСН
E-mail: niisf@niisf.ru

Дорф Валерий Анатольевич

АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва, Россия
Кандидат технических наук
Директор по научной работе
E-mail: dorfva@ioes.ru

Красновский Ростислав Олегович

АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва, Россия
Кандидат технических наук, с.н.с.
E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

Сultyгова Пятимат Суламбековна

Ингушский государственный университет, г. Магас
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: sultygova@yandex.ru

Капустин Дмитрий Егорович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия
Кандидат технических наук
E-mail: kde90@bk.ru

Information about authors:

Shubin Igor Lubimovich

Research institute of construction physics RAASN
(NIISF RAASN), Moscow, Russia
Director NIISF RAASN
E-mail: niisf@niisf.ru

Dorf Valeriy Anatolyevich

JSC «Institute «Orgenergostroy», Moscow, Russia
PhD in Sci. Tech.
Director of Science
E-mail: dorfva@ioes.ru

Krasnovskij Rostislav Olegovich

JSC «Institute «Orgenergostroy», Moscow, Russia
PhD in Sci. Tech., senior research worker
E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

Kapustin Dmitry Egorovich

Moscow State National Research University of Civil Engineering, Moscow, Russia
PhD in Sci. Tech., assistant professor
E-mail: kde90@bk.ru

Sultygova Pyatimat Sulambekovna

Ingush State University, Magas, Russia
PhD in Sci. Tech., Associate Professor
E-mail: sultygova@yandex.ru