УДК 666.97.620.1

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-2-178-183

© В. А. Дорф, канд. техн. наук

E-mail: dorfva@ioes.ru

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

E-mail: krasnovskijro @ioes.ru

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук
(АО «Институт «Оргэнергострой»»)

E-mail: kde90@bk.ru

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

© V. A. Dorf, PhD in Sci. Tech.

E-mail: dorfva@ioes.ru

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

E-mail: krasnovskijro @ioes.ru

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech.
(JSC Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: kde90@bk.ru

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

ЭФФЕКТ ПУЦЦОЛАНИЗАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ МАТРИЦЫ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОВ

POZZOLANIC EFFECT AT HIGH TEMPERATURES OF HIGH STRENGTH CEMENT-SAND MATRIX OF STEEL-FIBER CONCRETE

Рассматриваются результаты воздействия высоких температур при пожаре на изменение прочностных характеристик сталефибробетонных с высокопрочной цементно-песчаной матрицей, содержащей микрокремнезем. Показано, что в диапазоне температур от 200 до 300 °С проявляется эффект существенного упрочнения как матрицы, так и сталефибробетонных на их основе с различными типами фибры и процентами армирования, который объясняется пуццолановой реакцией взаимодействия в присутствии влаги порошкообразных силикатных компонентов с гидроксидом кальция.

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

The document specifies the results of effects of high temperatures at fire on strength characteristics of steel fiber reinforced concrete (SFRC) with high-strength cement-sand matrix containing microsilica. It is shown that within 200–300 °C temperatures there emerges the effect of essential hardening of both matrices, and SFRC with different types of fiber and percent of reinforcement, which can be explained by pozzolanic reaction of interacting of pulverous silicate moisture containing components with calcium hydroxide.

Keywords: cement-sand matrix, microsilica, steel-fiber reinforced concrete (SFRC), effects of high temperatures, pozzolanic reaction.

Сталефибробетон как композитный строительный материал, обладающий по сравнению с бетоном значительно более высокой прочностью на растяжение, известен достаточно давно [1]. Начиная с девяностых годов прошлого столетия за счет введения в состав матрицы сталефибробетона гиперпластификаторов и микрокремнезе-

ма [2], а также использования фибры из высокопрочной легированной стали [3] были получены самоуплотняющиеся сталефибробетонные смеси и особо высокопрочные сталефибробетоны из них. В отличие от бетона, при проектировании состава сталефибробетона необходимо учитывать не только требуемые физико-механические

и эксплуатационные характеристики, но и вид, и размеры изготавливаемой сталефибробетонной конструкции [4].

АО «Институт «Оргэнергострой»» занимается исследованием сталефибробетонов применительно к несъемной сталефибробетонной опалубке, используемой при возведении зданий и сооружений сборно-монолитным методом [5–8]. Несъемная опалубка изготавливается в виде плоских элементов (листов) толщиной 20–30 мм, в которых волокна стальной фибры, независимо от их длины, расположены в плоскостях, параллельных поверхности листов. Листы опалубки являются и ограждающими, и несущими элементами. В процессе бетонирования строительных конструкций листы опалубки воспринимают нагрузку от укладываемой в конструкцию бетонной смеси, работая на растяжение при изгибе, а в процессе эксплуатации выполняют функции рабочей арматуры [9], работая на растяжение или сжатие. Несъемная сталефибробетонная опалубка выполняет функции защитного слоя, в том числе защищает стержневую арматуру и бетон от воздействия высоких температур при пожаре [10].

Из условия работы несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента к ней предъявляются достаточно высокие требования по прочности, которые и достигаются за счет использования самоуплотняющейся матрицы классом не ниже В60 и высокопрочной стальной фибры.

Высокая прочность и плотность матрицы необходимы для обеспечения заделки в ней высокопрочных волокон фибры, за счет чего полностью используются ее прочностные характеристики при растяжении. Требуемая прочность матрицы достигается за счет использования портландцемента класса не ниже 42,5 при расходе не менее 750 кг/м³, водоцементном отношении не более 0,3 и введения в состав матрицы микрокремнезема и гиперпластификаторов.

Такой состав матрицы близок к составам порошковых бетонов [2]. Однако, как показал эксперимент [9], для обеспечения адгезии несъемной опалубки с бетоном в состав матрицы должен входить песок с максимальным размером зерен не менее 2,5 мм. В противном случае контактирующая с бетоном поверхность несъем-

ной опалубки получается настолько гладкой, что в процессе эксплуатации железобетонных конструкций в их сжатой зоне имеет место отслоение опалубки от бетона.

Процент фибрового армирования сталефибробетона опалубки зависит от требуемой прочности сталефибробетона на растяжение и растяжение при изгибе, типа фибры (в том числе формы волокон), прочности стали на растяжение, склонности волокон фибры к комкованию (образованию «ежей») при перемешивании сталефибробетонной смеси. Исходя из этих условий, содержание фибры может достигать 11 % по объему [11], диаметр фибр может меняться от 0,1 до 1,2 мм, а длина — от 6 до 40 мм. Следует также принимать во внимание, что прочность сталефибробетона на сжатие [5], в отличие от прочности на растяжение, и растяжение при изгибе [6] мало зависит от процента армирования, который в данном случае лишь повышает трещиностойкость.

Особенностью экспериментальных исследований влияния высоких температур при пожаре на физико-механические и эксплуатационные характеристики сталефибробетона как материала является отсутствие стандартизированной методики испытания. Это связано с тем, что цементные бетоны и сталефибробетоны на их основе являются негорючими материалами [12]. Методика испытаний на огнестойкость при пожаре регламентирована только для строительных конструкций [13]. Согласно ГОСТ 30247.0–94 поверхность конструкции нагревают до 1090 °С в течение 180 мин по стандартному температурному режиму, описываемому 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 общем случае при воздействии высоких температур при отсутствии непрерывной жидкой фазы (воды) происходит газовая коррозия как волокон стальной фибры [14], так и цементного камня, приводящая к снижению их механических, а также эксплуатационных характеристик.

Исходя из изменений, происходящих в структуре цементно-песчаной матрицы и стали фи-

бры, воздействующие температуры можно разбить на несколько характерных диапазонов: 20–110 °С; 110–200 °С; 200–300 °С; 300–400 °С; 500–800 °С; 800–1000 °С; свыше 1000 °С.

Исходя из приведенной градации температур, при проведении экспериментов образцы матриц и сталефибробетона нагревали в печи по стандартному температурному режиму до температуры 110, 200, 300, 400, 600, 800 и 1100 °С. Затем образцы выдерживали в печи при заданной температуре в течение такого времени, чтобы общая продолжительность испытания составляла 180 мин. После этого печь отключали, и она остывала вместе с образцами до нормальной (комнатной) температуры (22 ± 3) °С. При этом как при нагреве, так и при выдержке и остывании выколов и взрывного разрушения образцов не было отмечено. После охлаждения образцы испытывали на изгиб при комнатной температуре.

По описанной методике испытывали серии образцов близнецов из сталефибробетонных, отличавшихся составом (табл. 1) и прочностью матрицы, а также видом и содержанием в них стальной фибры.

Для исследования было выбрано пять видов фибры (табл. 2), отличавшихся диаметром волокон (от 0,3 до 1,2 мм), их длиной (от 15 до 40 мм), наличием анкеров, а также пределом прочности стали (от 580 до 2400 МПа).

Содержание фибры в матрице изменяли от нуля до 6 % (по объему), за исключением фибры ФСП-А 30'0,3, так как при ее содержании более 1,5 % при перемешивании сталефибробетонной смеси волокна образывали «ежи» [8].

Каждая серия состояла не менее чем из трех образцов-близнецов в форме пластин толщиной 20 ± 2 мм, что обеспечивало их равномерный прогрев.

Эксперимент показал, что при нагреве матрицы, независимо от ее прочности на растяже-

ние при изгибе, определенной при нормальной температуре 20 ± 2 °С, в диапазоне температур 200–300 °С имеет место существенный прирост прочности (рис. 1), который может составлять от 1,3 до 2,8 МПа в зависимости от прочности матрицы.

Если же рассматривать не абсолютные значения прочности, а их изменение относительно прочности при нормальной температуре, то прирост прочности составляет для обеих матриц примерно 30 % от их прочности при нормальной температуре (рис. 2).

При введении в матрицу стальной фибры эффект прироста прочности при нагреве в диапазоне температур 200–300 °С сохранялся. Но при этом прирост прочности сталефибробетона на растяжение при изгибе зависел от вида фибры и процента армирования (рис. 3, 4) и составлял от 12 до 56 %.

Более низкие, чем у матрицы, значения прочности сталефибробетонных на некоторых видах фибры (ФСПВ 30'0,8, ФСПЛ 40'0,8, Narex 32'1,2) при $\mu_f = 0,5$ %, когда их волокна расположены относительно друг от друга на боль-

Рис. 1. Зависимость прочности на растяжение при изгибе от температуры нагрева цементно-песчаной матрицы с начальной прочностью 5,0 и 8,5 МПа

Таблица 1

Составы цементно-песчаной матрицы сталефибробетонных

Состав	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Состав на 1 м³, кг						Отношение компонент Ц:П:МК:ГП	В/Ц
		Цемент (Ц)		Песок кварцевый (П)		Микрокрем- незем (МК)	Гиперпластифи- катор Sika 5-800 (ГП)		
		Класс	Расход	Максимальный диаметр зерен, мм	Расход				
1	5,0	ЦЕМ 42.5	800	5	1250	45	8	1:1,56:0,06:0,01	0,25
2	8,5	ЦЕМ 52.5	725	2,5	1213	56,5	10,5	1:1,6:0,08:0,01	0,28

Таблица 2

Характеристики фибры

Вид фибры	Характеристика фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению, МПа
ФСПВ 30'0,8	Рубленая из проволоки волнистая	30	0,8	860
ФСПВ-Люкс 15'0,3		15	0,3	2450
ФСП-А 30'0,3	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон	30	0,3	2650
Нарех 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 изменения прочности на растяжение при изгибе от температуры нагрева матриц с начальной прочностью 5,0 и 8,5 МПа

Рис. 3. Зависимость прочности на растяжение при изгибе от температуры нагрева сталефибробетонов с фиброй ФСПВ 15'0,3, ФСПА 30'0,3, ФСПВ 30'0,8, Нарех 32'1,2 и матрицей с прочностью $R_{fT} = 8,5$ МПа при армировании по объему $\mu_{fv} = 0,5$ %

шом расстоянии и прочность сталефибробетона определяется прочностью матрицы [4], можно объяснить следующим. При перемешивании и укладке сталефибробетонной смеси имеет место разуплотнение матрицы в результате вращения длинных жестких волокон фибры больших диаметров, которые работают как лопасти.

Относительно низкие значения прочности сталефибробетонов на некоторых видах фибры (ФСПВ 30'0,8 и ФСПЛ 40'0,8) при $\mu_{fv} = 6,0$ % можно объяснить недостаточным заанкерованием волокон в матрице.

Похожие результаты, связанные с эффектом прироста прочности при нагреве в диапазоне 200–300 °С, были получены при испытании на сжатие по методике, аналогичной примененной нами [15], образцов цилиндров диаметром 50 и высотой 100 мм.

Описанный эффект является следствием наличия в матрице микрокремнезема, вводимого с целью связывания свободной извести. При тепловой обработке от 20 до 250 °С в присутствии влаги возникает пуццолановая реакция, т. е. реакция взаимодействия порошкообразных силикатных компонентов с гидроксидом кальция цемента. При этом повышается прочность самой матрицы и улучшается сцепление цементно-песчаной матрицы с волокнами стальной фибры [15].

Полученный эффект может быть использован при термовлажностной обработке сталефибробетонных изделий при условии соответствующего подбора состава сталефибробетона и режима подъема температуры. Это позволит, в зависимости от поставленных задач, как сократить

Рис. 4. Зависимость прочности на растяжение при изгибе от температуры нагрева сталефибробетонных с фиброй ФСПВ 15×0,3, ФСПВ 30×0,8, ФСПЛ 40×0,8, Narex 32×1,2 и матрицей прочностью $R_{tr} = 8,5$ МПа при армировании по объему $\mu_v = 6,0\%$

продолжительность изготовления изделий за счет повышения распалубочной прочности, так и повысить их эксплуатационную прочность или уменьшить расход цемента.

Библиографический список

1. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: АСВ, 2011. 642 с.
2. Калашиников В. И., Тараканов О. В., Кузнецов Ю. С., Володин В. М., Белякова Е. А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернистых порошковых смесей // Magazine of Civil Engineering. 2012. № 8. С. 47–53.
3. Каприелов С. С., Карпенко Н. И., Шейнфельд А. В., Кузнецов Е. Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С. URL: <http://www.master-concrete.com/i/content/reference/66.doc>.
4. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2005. С. 42.
5. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Горбунов И. А. Влияние характеристик фибры на кубиковую и призменную прочность сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2013. № 6. С. 6–9.
6. 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.

7. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачев К. В., Туркин В. В. Влияние характеристик стальной фибры на ее распределение в цементно-песчаной матрице // Технологии бетонов. 2013. № 10. С. 44–46.

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

9. Капустин Д. Е. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий конструктивный элемент железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 282 с.

10. Пушенко А. С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2016. 217 с.

11. Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete Structures, by Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2006.

12. ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.

13. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

14. Арзамасов Б. Н., Сидорин И. И., Косолапов Г. Ф. и др. Материаловедение: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.

15. Taia Yuh-Shiou, Panb Huang-Hsing, Kungb Ying-Nien. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C // Nuclear Engineering and Design. 2011.

References

1. Rabinovich F. N. *Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii* [Composites based on dispersion reinforced concrete. Issues of the theory and design, technology, construction]. Moscow, ASV Publ., 2011, 642 p.
2. Kalashnikov V. I., et al. *Betony novogo pokoleniya na osnove sukhikh tonkozernistykh poroshkovykh smesey* [Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes]. Magazine of Civil Engineering, 2012, no. 8, pp. 47–53.
3. Kaprielov S. S., Karpenko N. I., Sheynfel'd A. V., Kuznetsov E. N. *O regulirovanii modulya uprugosti i polzuchesti vysokoprochnykh betonov s modifikatorom MB-50S* [On regulation of the module of elasticity and creep

of high-strength concrete with the MB-50S modifier]. Available at: <http://www.master-concrete.com/i/content/reference/66.doc>.

4. Pukharenyo Yu. V. *Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svoystv fibrobetonov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and practical bases of formation of structure and properties of fiber reinforced concrete. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Saint-Petersburg, 2005, 42 p.

5. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Gorbunov I. A. *Vliyaniye kharakteristik fibry na kubikovuyu i prizmennuyu prochnost' stalefibrobetona s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of fiber characteristics on the cubical and prismatic durability of a steel fiber reinforced concrete with cement and sand matrix]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2013, no. 6, pp. 6–9.

6. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Gorbunov I. A. *Prochnost' stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey na rastyazhenie pri izgibe* [Durability of steel fiber reinforced concrete with cement and sand matrix on tension at bending]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2014, no. 2, pp. 2–5.

7. Dorf V. A., et al. *Vliyaniye kharakteristik stal'noy fibry na ee raspredeleniye v tsementno-peschanoy matritse* [Influence of characteristics of steel fiber on its distribution in cement and sand matrix]. *Tekhnologii betonov – Technology of concrete*, 2013, no. 10, pp. 44–46.

8. Dorf V. A., et al. *Vliyaniye tipa i sodержaniya fibry na plotnost' stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of the type and content of fiber on density of steel-fiber reinforced concrete with cement and sand matrix]. *Tekhnologii betonov – Technology of concrete*, 2014, no. 3, pp. 30–32.

9. Kapustin D. E. *Nes'emnaya stalefibrobetonnaya opalubka kak nesushchiy konstruktivnyy ehlement zhelezobetonnykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy AEhS*. Diss. kand. tekhn. nauk [A fixed steel-fiber reinforced concrete formwork as the bearing structural element of reinforced concrete designs of buildings and constructions of the NPP. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2016, 282 p.

10. Pushenko A. S. *Vysokoprochnyy beton v usloviyakh vozdeystviya vysokikh temperatur pri pozhare: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [High-strength concrete in the conditions of influence of high temperatures at fire. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Rostov-on-Don, 2016, 217 p.

11. *Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete Structures*. Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2006.

12. GOST 30244–94. *Materialy stroitel'nye. Metody ispytaniy na goryuchest'* [GOST 30244–94. Materials for construction. Test methods on combustibility].

13. GOST 30247.0–94. *Konstruksii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestoykost'. Obshchie trebovaniya* [GOST 30247.0–94. Building constructions. Test methods on fire resistance. General requirements].

14. Arzamasov B. N., et al. *Materialovedenie. Uchebnik dlya vuzov* [Materials science. Textbook for higher education institutions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 384 p.

15. Taia Yuh-Shiou, Panb Huang-Hsing, Kungb Ying-Nien. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 C. *Nuclear Engineering and Design*, 2011.