УДК 666.97.620.1

© В. А. Dorf, канд. техн. наук, директор по научной работе

© Р. О. Красновский, канд. техн. наук, с. н. с.

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук

(АО «Институт «Оргэнергострой», Москва, Россия)

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

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

(Ингушский государственный университет,

г. Магас, Россия)

E-mail: sultygova@yandex.ru

© В. В. Туркин, зав. строительной лабораторией

© П. В. Травкин, ведущий инженер

(АО «Институт «Оргэнергострой», Москва, Россия)

E-mail: vvturkin@yandex.ru, travnik2008@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-147-154

© V. A. Dorf, PhD in Sci. Tech., Director for scientific and research activity

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

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech.

(JSC «Institute «Orgenergostroy», Moscow, Russia)

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

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

(Ingush State University, Magas, Russia)

E-mail: sultygova@yandex.ru

© V. V. Turkin, Head of Construction Laboratory

© P. V. Travkin, leading engineer

(JSC «Institute «Orgenergostroy», Moscow, Russia)

E-mail: vvturkin@yandex.ru, travnik2008@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ МАТРИЦЫ И ВИДА СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ НА ПЛОТНОСТЬ И МОДУЛЬ УПРУГОСТИ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОВ ПРИ НАГРЕВЕ В ПРОЦЕССЕ ПОЖАРА

EFFECT OF DENSITY OF CEMENT-SAND MATRIX AND TYPE OF STEEL FIBERS ON THE DENSITY AND ELASTICITY MODULUS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE AT HEATING DURING THE FIRE

Рассматриваются результаты воздействия высоких температур при пожаре на изменение плотности и модуля упругости сталефибробетонных при разных значениях плотности цементно-песчаной матрицы, соответствующей ее прочности на растяжение при изгибе 5,0 и 8,5 МПа. Показано, что в диапазоне температуры от 20 до 1100 °С диаграммы «Плотность сталефибробетона — температура нагрева» носят линейный характер и их форма не зависит от вида фибры и ее содержания в сталефибробетоне. Результаты выполненных исследований позволяют определять изменение модуля упругости сталефибробетона после нагрева.

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

The paper considers the results of the impact of high temperatures during the fire on changes in the density and elasticity modulus of steel fiber reinforced concrete (SFRC) at different values of density of the cement-sand matrix corresponding to its flexural strength of 5.0 and 8.5 MPa. It is shown that in the temperature range from 20 to 1100 °C, the diagrams «Density of steel fiber reinforced concrete — heating temperature» are linear and their shape does not depend on the type of fiber and its content in steel fiber reinforced concrete. The results of the performed studies allow determining the change in the elastic modulus of the SFRC after heating.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, cement-sand matrix, high temperature impact, density, elasticity modulus.

Несъемная сталефибробетонная (СФБ) опалубка в процессе эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций защищает рабочую стержневую арматуру и бетон от воздействия

окружающей среды, включая высокие температуры при пожаре.

Ранее [1–3] при проведении исследований по влиянию высоких температур на свойства СФБ

с различными видами фибры мы проводили эксперименты на составах, имевших практически одну и ту же матрицу, для исключения влияния ее свойств на результаты эксперимента.

При выполнении настоящей работы исследования свойств СФБ проводили, используя цементно-песчаную матрицу двух составов (табл. 1), но изготовленных из одних и тех же материалов. Прочность на растяжение при изгибе этих составов матрицы была равна 5,0 и 8,5 МПа, плотность их, соответственно, составила 2,186 и 2,331 г/см³.

Исследования были проведены с использованием четырех видов стальной фибры, отличающихся методами их изготовления (рубленая из проволоки или резанная из листа), формой волокна (гладкая, волнистая, переменного профиля), размерами, прочностью стали и наличием или отсутствием анкеров (табл. 2). Содержание фибры в СФБ было 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 и 6,0 % (по объему), за исключением фибры ФСПА 30×0,3, содержание которой было не более 1,5 %, поскольку при большем ее объеме волокна СФБ при перемешивании смеси сцеплялись друг с другом, образуя «ежи» [4]. СФБ с каждым видом фибры изготавливали на двух матрицах.

Исследования проводили на образцах-пластинах 260×60 мм толщиной 20 мм. Выбран-

ные размеры образцов обеспечивали их равномерный прогрев при нагревании.

Каждая серия состояла не менее чем из трех образцов.

Образцы нагревали в муфельной печи до температуры 110, 200, 300, 400, 600, 800 и 1100 °С по стандартному режиму по ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования». При каждой заданной температуре образцы выдерживали в течение времени, необходимого для того, чтобы общая продолжительность испытания составляла 180 мин, после чего печь отключали, и образцы в ней остывали до нормальной температуры (22 ± 3) °С.

На рис. 1 показано изменение при нагреве плотности исследованных матриц. Видно, что абсолютные значения плотности матрицы при нагреве изменяются нелинейно.

До температуры 800 °С плотность матриц была различной, а при температуре выше 800 °С плотность обеих матриц имела одинаковые значения. Незначительное снижение плотности в диапазоне от 400 до 800 °С связано с потерей цементным камнем химически связанной воды и трансформацией кремния, а в диапазоне от 800 до 1100 °С структура и плотность матриц остаются практически неизменными. Общее сни-

Таблица 1

Составы цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов

Плотность, г/см ³	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Расход на 1 м ³ , кг						
		Цемент		Песок	Вода	Микрокремнезем	Гиперпластификатор Sika 5-800	Водоцементное отношение (В/Ц)
		Класс	Расход					
2,331	8,5	52,5	800	1250	260	45	8	0,33
2,186	5,0	42,5	725	1213	200	56,5	10,5	0,28

Таблица 2

Характеристики фибры

Вид фибры	Характеристика фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению, МПа
ФСПВ 15×0,3	Рубленая из стальной проволоки волнистая	15	0,3	2450
ФСПА 30×0,3	Рубленая из стальной проволоки гладкая с анкерами по концам волокон	30	0,3	2650
ФСПВ 30×0,8	Рубленая из стальной проволоки волнистая	30	0,8	860
ФСЛ 40×0,8	Резанная из стального листа переменного профиля	40	0,8	580

Рис. 1. Изменение при нагреве плотности цементно-песчаных матриц с начальной прочностью 5,0 и 8,5 МПа

жение плотности при нагреве составило от 7 до 12 %.

При этом никак не проявляется эффект пуццоланизации цементного камня [7]. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что продукты пуццоланизации заполняют поры цементного камня, повышая его прочность, но не изменяя (в пределах ошибки измерения) его объем и общую массу цементно-песчаной матрицы.

На рис. 2–5 показано полученное в экспериментах изменение при нагреве плотности СФБ с различными видами фибры и разными матрицами. На этих рисунках показано также и изменение плотности матриц.

Диаграммы «Плотность — температура нагрева» для всех исследованных СФБ свидетельствуют о практически одинаковом снижении плотности пропорционально температуре нагрева, независимо от вида фибры и ее содержания. Изменение плотности может быть описано линейной зависимостью [1]

$$\gamma_i = 0,0002t_i + \gamma_{t_{20}}, \quad (1)$$

где i — значение плотности при температуре нагрева t_i , г/см³; t_i — температура нагрева, °C; $\gamma_{t_{20}}$ — плотность СФБ при температуре 20 °C, г/см³.

На рис. 2–5 видно, что плотность СФБ превышает плотность матриц, и этот эффект сильнее проявляется при увеличении содержания фибры. При объеме фибры 0,5 % он практически не проявляется, а при армировании 6 % разница достигает 11–15 %. Это может быть объяснено вкладом в общую массу СФБ массы металла фибры — до

температуры 600 °C, а при больших температурах — продуктов его температурной коррозии.

Хотя в общем случае введение фибры повышает начальную плотность СФБ, однако плотность СФБ с фиброй ФСПВ 30×0,8 при матрице прочностью 5,0 МПа была больше, чем при матрице прочностью 8,5 МПа (хотя при температуре 20 °C матрица 8,5 МПа имела большую плотность).

Степень нарушения структуры матрицы может различаться для разных типов фибры. Можно предположить, что более жесткая фибра ФСПВ 30×0,8 нарушает структуру матрицы в большей степени, и при малых сроках схватывания разрывы не полностью ликвидируются, снижая плотность СФБ.

Длинные волокна фибры (30 мм и более), вращаясь при перемешивании и укладке СФБ смеси, могут, как показали, в том числе и ультразвуковые измерения, создавать в матрице разрывы [5, 6], которые, однако, могут самоликвидироваться («затекать») до начала схватывания цементного теста, когда смесь еще сохраняет подвижность. Степень нарушения структуры матрицы может различаться для разных типов фибры.

Можно предположить, что более жесткая фибра ФСПВ 30×0,8 нарушает структуру матрицы в большей степени, и при малых сроках схватывания разрывы в ней не полностью ликвидируются [6], снижая таким образом плотность СФБ.

Эффект пуццоланизации [7] в СФБ со всеми видами фибры и всеми процентами фибрового армирования, так же как и в матрицах, не сказывается на их плотности.

Таким образом, можно принять, что введение в матрицу волокон стальной фибры повышает плотность СФБ пропорционально проценту армирования, но не сказывается на виде диаграмм изменения плотности СФБ при нагреве.

Полученные результаты позволяют при проведении обследования СФБ конструкций и железобетонных конструкций с несъемной СФБ опалубкой, подвергшихся нагреву при пожаре, найти, используя формулу (1), диаграмму «Плотность СФБ–температура нагрева», если известна плотность не нагретых при пожаре участков конструкций (принимаемая за $\gamma_{t_{20}}$).

Рис. 2. Зависимость от температуры нагрева плотности матрицы и СФБ с фиброй ФСПВ 15×0,3 при ее содержании (по объему) 0,5 % (а), 1 % (б), 1,5 % (в), 3 % (г), 6 % (д)

Одновременно с оценкой воздействия высоких температур на изменение плотности СФБ нами на тех же образцах была проведена оценка воздействия высоких температур на изменение в них скорости ультразвука.

Скорость ультразвука измеряли поверхностным методом на базе 120 мм, используя преобразователи с коническими концентраторами.

На рис. 6 приведены диаграммы изменения при нагреве скорости ультразвука в матрице, а на рис. 7 — в СФБ.

Диаграммы «Скорость ультразвука–температура нагрева» матриц имеют нелинейный характер, но их можно представить в виде трех линейных участков: в диапазоне температуры от 20 до 400 °C, от 400 до 600 °C и от 600 до 1100 °C (аналогично полученным в [6]), что обусловлено

Рис. 3. Зависимость от температуры нагрева плотности матрицы и СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3 при ее содержании (по объему) 0,5 % (а), 1 % (б), 1,5 % (в)

Рис. 4. Зависимость от температуры нагрева плотности матрицы и СФБ с фиброй ФСПВ 30×0,8 при ее содержании (по объему) 0,5 % (а), 1,5 % (б), 3 % (в), 6 % (г)

Рис. 5. Зависимость от температуры нагрева плотности матрицы и СФБ с фиброй ФСЛ 40×0,8 при ее содержании (по объему) 1 % (а), 3 % (б), 6 % (в)

происходящими в матрице при нагреве испарением свободной воды из пор цементного камня, потерей цементным камнем химически связанной воды и трансформацией кремния и, наконец, температурной коррозией стальной фибры.

Значения скорости ультразвука при этом различаются не более чем на 100 м/с, что лежит в пределах погрешности эксперимента.

Сравнение диаграмм «Скорость ультразвука–температура нагрева» (рис. 7) показывает, что ранее сделанный вывод [6] о том, что скорость ультразвука в матрице и СФБ не зависит от вида фибры и ее содержания, можно распространить и на ее изменение при нагреве при пожаре от 20 до 1100 °С.

Полученный результат показывает возможность при проведении обследования СФБ конструкций и железобетонных конструкций с несъемной СФБ опалубкой оценить изменение модуля упругости СФБ после нагрева. Измерив скорость ультразвука на отдельных участках конструкций, подвергшихся при пожаре нагреву различной степени, и построив диаграммы «Плотность–температура нагрева», можно оце-

нить значение модуля упругости СФБ участка конструкции, подвергшегося нагреву при пожаре, исходя из зависимости

$$E = \gamma \sqrt{c}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости; γ — плотность; c — скорость ультразвука.

Приведенные экспериментальные исследования и их анализ позволяют сделать следующие основные выводы.

Рис. 6. Изменение при нагреве скорости ультразвука в цементно-песчаных матрицах с начальной прочностью 5,0 и 8,5 МПа

Рис. 7. Изменение при нагреве скорости ультразвука в цементно-песчаных матрицах прочностью 5,0 и 8,5 МПа и СФБ с фиброй ФСПВ 15×0,3 (а); ФСПА 30×0,3 (б); ФСПВ 30×0,8 (в); ФСЛ 40×0,8 (г)

В общем случае плотность СФБ превышает плотность матриц пропорционально проценту фибрового армирования. Различие при армировании 6 % достигает 11–15 %.

Независимо от плотности и прочности матрицы, вида стальной фибры и процента фибрового армирования снижение плотности СФБ от нагрева при пожаре может быть описано линейной зависимостью.

Скорость ультразвука при нагреве при пожаре для матриц и СФБ практически не зависит от вида фибры и процента фибрового армирования.

Зная изменение скорости ультразвука в матрице и СФБ участков конструкции, подвергшихся нагреву при пожаре, и изменение их плотности, можно определить изменение их модуля упругости.

Эффект пуццоланизации в матрицах и СФБ с разными видами фибры и процентами фибрового армирования не оказывает влияния на их плотность.

Библиографический список

1. Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П. С., Травкин П. В. Влияние высоких температур на изменение плотности, массы и линейных размеров сталефибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 112–121.
2. Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П. С., Зайцев Д. А., Травкин П. В. Влияние высоких температур на скорость распространения ультразвука в сталефибробетоне // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 5 (70). С. 50–57.
3. Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П. С., Травкин П. В. Изменение модуля упругости при нагреве сталефибробетонов с высокопрочной цементно-песчаной матрицей // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5 (76). С. 144–152.
4. Капустин Д. Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 212 с.
5. 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 (92). С. 30–32.

6. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Gorbunov I. A., Nuriyev R. P. Скорость распространения ультразвука в сталефибробетонах с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2014. № 3. С. 5–8.

7. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sultygova P. S. Эффект пуццоланизации при высоких температурах высокопрочной цементно-песчаной матрицы сталефибробетон // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 178–183.

References

1. Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sultygova P. S., Travkin P. V. *Vliyanie vysokikh temperatur na izmenenie plotnosti, massy i lineynykh razmerov stalefibrobetonov* [Effect of high temperatures on changes in density, mass, and linear dimensions of steel fiber reinforced concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 2 (73), pp. 112–121.

2. Krasnovskiy R. O., et al. *Vliyanie vysokikh temperatur na skorost' rasprostraneniya ul'trazvuka v stalefibrobetone* [The effect of high temperatures on the speed of ultrasound propagation in steel fiber reinforced concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 5 (70), pp. 50–57.

3. Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sultygova P. S., Travkin P. V. *Izmenenie modulya uprugosti pri nagreve stalefibrobetonov s vysokoprochnoy tsementno-peschanoy*

matritsey [Change of the elasticity modulus at heating of steel-fiber concrete with high-strength cement-sand matrix]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 5 (76), pp. 144–152.

4. Kapustin D. E. *Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki nes'emnoy stalefibrobetonnoy opalubki kak nesushchego elementa zhelezobetonnykh konstruktсий. Diss. kand. tekhn. nauk* [Strength and deformation characteristics of fixed steel-fiber concrete formwork as a bearing element of reinforced concrete structures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2015, 212 p.

5. Dorf V. A., et al. *Vliyanie tipa i sodержaniya fibry na plotnost' stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of the type and content of fiber on the density of steel fiber concrete with a cement-sand matrix]. *Tekhnologii betonov – Concrete technologies*, 2014, no. 3 (92), pp. 30–32.

6. Dorf V. A., et al. *Skorost' rasprostraneniya ul'trazvuka v stalefibrobetonakh s tsementno-peschanoy matritsey* [The speed of ultrasound propagation in steel fiber-reinforced concrete with a cement-sand matrix]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2014, no. 3, pp. 5–8.

7. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sultygova P. S. *Effekt putstsolanizatsii 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.