Строительные материалы и изделия

УДК 666.97.620.1

© Р. О. Красновский, канд. техн. наук,
ст. научн. сотрудник
(АО «Институт «Оргэнергострой»)
E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук, доцент
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет)
E-mail: kde90@bk.ru

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

© П. В. Травкин, ведущий инженер
(АО «Институт «Оргэнергострой»)
E-mail: travnik2008@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-144-152

© R. O. Krasnovskij, PhD in Sci. Tech.,
senior research worker
(JSC «Institute «Orgenergostroy»)
E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech, Associate Professor
(Moscow State National Research University
of Civil Engineering)
E-mail: kde90@bk.ru

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

© P. V. Travkin, leading engineer
(JSC «Institute «Orgenergostroy»)
E-mail: travnik2008@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОВ С ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ МАТРИЦЕЙ

CHANGE OF THE ELASTICITY MODULUS AT HEATING OF STEEL-FIBER CONCRETE WITH HIGH-STRENGTH CEMENT-SAND MATRIX

Рассматриваются результаты воздействия высоких температур при пожаре на изменение модуля упругости сталефибробетонных с высокопрочной цементно-песчаной матрицей и различным содержанием фибры разной прочности, вида и диаметра. Показано, что в диапазоне температур от 20 до 1100 °С диаграммы «температура нагрева — модуль упругости» матрицы и сталефибробетона имеют S-образный характер с монотонным снижением модуля упругости с ростом температуры. При этом значения модуля упругости сталефибробетонных, в основном, определяются изменением физико-механических характеристик матрицы, вызванным воздействием температуры. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методики оценки степени повреждения сталефибробетонных конструкций при пожаре.

Ключевые слова: сталефибробетон, воздействие высоких температур, процент армирования по объему, изменение модуля упругости.

The paper considers the effects of high temperatures in case of fire on the change of the elastic modulus of steel fiber concrete with a high-strength cement-sand matrix and various fiber contents of different strength, types and diameters. It is shown that in the temperature range from 20 to 1100 °C, the «heating temperature – elastic modulus» diagrams of the matrix and steel fiber concrete are S-shaped, with a monotonous decrease of the elastic modulus with increasing temperature. Herewith, the elastic modulus of steel fiber concrete is mainly determined by a change in the physico-mechanical characteristics of the matrix caused by the temperature effect. The results obtained in this research can be used at developing the methods for assessing the degree of damage to steel fiber reinforced concrete structures caused by fire.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, exposure to high temperatures, percentage of reinforcement by volume, change of the elastic modulus.

Одним из основных показателей при оценке технического состояния сталефибробетонных (СФБ) конструкций после пожара является значение модуля упругости и характер его измене-

ния под воздействием изменяющейся температуры.

Из литературы [1–8] известно, что общие закономерности изменения модуля упругости бе-

тонов, изготовленных на портландцементе, при воздействии на них повышенных температур аналогичны имеющим место для других механических характеристик бетонов. При этом модуль упругости:

- при температуре от 21 до 96 °С не изменяется [8];
- до 100 °С снижается до 70 % от первоначального [1];
- до 500 °С снижается до 43 % от первоначального [1];
- при 700 °С снижается до 18 %;
- от 800 до 1000 °С снижается мало [6];
- от 1100 до 1200 °С и выше достигает минимального значения 2–10 МПа [4, 6].

При воздействии повышенных температур в диапазоне от 400 до 600 °С в стали волокон фибры одновременно проходят два процесса [9]:

- снижение до нуля модуля упругости с переходом в пластическое состояние;
- быстрая поверхностная температурная коррозия под воздействием перегретого водяного пара, образовавшегося в результате деструкции цементного камня.

В отношении сталефибробетонов имеющиеся литературные данные не позволяют оценить влияние нагрева на изменение их модуля упругости.

Учитывая результаты анализа литературных данных, нами на основе ранее проведенных экспериментов при нормальной [10] и повышенной [11] температуре была выполнена оценка влияния вида и содержания фибры и на изменение модуля упругости СФБ при воздействии высоких температур при пожаре.

Модуль упругости E определяли из выражения, полученного на основе известной зависимости¹, связывающей модуль упругости со ско-

ростью ультразвука в материале с плотностью материала γ :

$$E = \gamma \sqrt{c}.$$

Чтобы исключить влияние характеристик матрицы, исследования были проделаны для образцов СФБ с одинаковым составом высокопрочной самоуплотняющейся цементно-песчаной матрицы (табл. 1).

Для уменьшения водоотделения и улучшения пластичности матрицы в ее состав были добавлены микрокремнезем и пластификатор, что важно с точки зрения технологии изготовления СФБ.

Образцы для исследования были изготовлены с фиброй пяти видов (табл. 2).

Объемное содержание фибры в матрице изменяли от 0 до 6 %, кроме СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3, так как при количестве этой фибры более 1,5 % при размешивании СБФ-смеси волокна сцеплялись в пучки-«ежи».

Для равномерного прогрева без растрескивания были изготовлены образцы в форме пластин размером 260×60 мм, толщиной 20 мм. Визуальное обследование образцов после нагрева и последующего остывания до нормальной температуры показало, что трещин на поверхности и отколов на них нет.

Каждая серия состояла минимум из трех образцов.

Образцы нагревали в муфельной печи по стандартному режиму для целлюлозного пожара по ГОСТ 30247.0–94 [19] до фиксированных значений температуры — 110, 200, 400, 600, 800 и 1100 °С, после чего их охлаждали вместе с печью до температуры (25±10) °С.

При проведении эксперимента измеряли:

- время распространения ультразвука на базе 120 мм, используя ультразвуковые преобразователи с коническими концентраторами;
- массу образцов взвешиванием с точностью 0,1 г;

Таблица 1

Состав цементно-песчаной матрицы

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

¹ МИ 11–87. Методические указания. ГСИ. Прочностные и деформационные характеристики бетонов при одноосном кратковременном статическом сжатии и растяжении. Методика выполнения измерений / НПО «ВНИИФТРИ». М.: Изд-во стандартов, 1987.

Таблица 2

Характеристики фибры

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
ФСРВ 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

• геометрические размеры образцов (толщину, ширину и длину) штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм.

Измерения проводили до нагревания и после нагрева образцов до заданной температуры и остывания. По результатам измерения размеров и массы вычисляли плотность.

Графики изменения модуля упругости матрицы и СФБ в зависимости от температуры нагрева приведены на рис. 1.

Из приведенных диаграмм можно сделать следующие выводы:

– диаграммы, независимо от вида фибры и ее содержания, имеют одинаковый S-образный характер;

– влияние эффекта пуццоланизации [12] на модули упругости не было выявлено, поскольку, как мы изучили ранее, пуццоланизация не приводит к изменению плотности [16] и скорости ультразвука [15];

– при нагреве от 20 до 1100 °С модуль упругости матрицы и СФБ монотонно снижается до значения 550 МПа, которое для всех видов фибры и процентов армирования примерно одинаково;

– на диаграммах изменения при нагреве модуля упругости можно выделить четыре температурных диапазона, соответствующих температурной деструкции цементного камня матрицы и стали волокон фибры [1, 2]:

• от 20 до 200 °С, на котором до температуры 100 °С происходит испарение воды, а от 100 до 200 °С — выпаривание свободной воды из пор цементного камня;

• от 200 до 600 °С, на котором до температуры 400 °С происходит потеря воды геля, а от 400 до 600 °С — начинаются потери химически связанной воды и происходит трансформация кварца;

• от 600 до 800 °С, на котором заканчивается потеря химически связанной воды, матрица существенно теряет прочность, а деформирование волокон стальной фибры переходит в пластическую стадию;

• от 800 до 1100 °С, на котором рост температуры не сказывается на изменении структуры цементного камня и при этом в результате температурной коррозии стали волокна фибры полностью разрушаются;

– на характер диаграмм СФБ в каждом диапазоне температур в определенной степени влияет вид фибры, однако с инженерной точки зрения это влияние несущественно.

Влияние вида фибры на характер изменения модуля упругости СФБ при нагреве можно более четко увидеть, рассматривая (рис. 2) изменение относительной разницы модулей упругости СФБ (E_{fb}) и матрицы (E_m): $(E_{fb} - E_m)/E_m$.

Анализ графиков показывает, что в диапазоне температур:

• от 20 до 400 °С и от 800 до 1100 °С модули упругости СФБ в зависимости от содержания и вида фибры отличаются от модуля упругости матрицы в пределах $\pm 20\%$, что при малых процентах армирования (0,5–1,0) может быть вызвано разуплотнением матрицы при перемешивании и укладке сталефибробетонной смеси в результате вращения не взаимодействующих между собой волокон фибры [17];

Рис. 1. Зависимость от температуры нагрева T модуля упругости E матрицы и СФБ с различным содержанием фибры по объему: а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

- от 400 до 800 °C в результате деструктивных процессов в цементном камне, связанных с потерей химически связанной воды и трансформацией кварца, модуль упругости СФБ превышает модуль упругости матрицы на 10–55 % в зависимости от вида фибры и процента армирования.

Влияние содержания фибры на характер изменения модуля упругости СФБ при разных значениях температуры нагрева показано на рис. 3.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает, что:

Рис. 2. Зависимость от температуры нагрева T относительного изменения разности модулей упругости $(E_f - E_m)/E_m$ СФБ с различным содержанием фибры по объему: а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

- при росте температуры от 20 до 1100 °С значения модуля упругости СФБ монотонно снижаются от 55 000 до 5500 МПа, т. е. на порядок;
- графики изменения модуля упругости с ростом температуры нагрева в зависимости

от содержания фибры можно разделить на два участка — от 0 до 1,5 %, где имеются максимумы и минимумы, определяемые видом фибры, и от 1,5 до 6,0 %, на котором диаграммы, как правило, имеют монотонный характер, а значение модуля

Рис. 3. Зависимость модуля упругости матрицы и СФБ от содержания фибры по объему при различной температуре нагрева: а — 20 °C; б — 110 °C; в — 200 °C; г — 400 °C; д — 600 °C; е — 800 °C; ж — 1100 °C

упругости изменяется незначительно. Однако в диапазоне температур от 400 до 600 °С в связи с переходом волокон фибры от упругого деформирования к пластическому различие в значениях модуля упругости для разных типов фибры может достигать 20 %;

- разброс значений модуля упругости, определяемых видом фибры, уменьшается по мере роста температуры.

Из приведенных результатов экспериментальных исследований с учетом анализа литературных данных можно сделать следующие **выводы**:

1. Значения модуля упругости, рассчитанные на основе измерения скорости ультразвука, примерно на 20 % превышают полученные при осевом растяжении [10], что соответствует разнице значений модулей упругости бетонов, полученных при статическом и динамическом нагружении².

2. Основные имеющиеся в литературе закономерности, связанные с влиянием нагрева бетона в диапазоне от нормальной температуры 20 до 1100 °С на его модуль упругости, могут быть распространены на СФБ с высокопрочной цементно-песчаной матрицей.

3. Диаграммы «температура нагрева — модуль упругости» имеют S-образный характер с монотонным снижением модуля упругости на порядок при росте температуры от 20 до 1100 °С. Степень снижения мало зависит от вида фибры и ее содержания.

4. Характерные участки диаграммы «температура нагрева — модуль упругости» в пределах диапазонов температур 20–200 °С, 200–800 °С и 800–1100 °С можно рассматривать как линейные, которые, соответственно, связаны с удалением свободной воды и пара из пор цементного камня (первый участок), с потерей воды геля и химически связанной воды, а также с трансформацией кварца заполнителей и переходом металла волокон фибры в пластическое состояние (второй участок), с разрушением в результате температурной коррозии стали фибры (третий участок).

5. Влияние пуццоланизации цемента на значения модуля упругости матрицы и СФБ в ха-

рактерном для нее диапазоне температур от 150 до 200 °С не было обнаружено.

6. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методики оценки степени повреждения сталефибробетонных конструкций при пожаре.

Библиографический список

1. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 296 с.
2. Некрасов К. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
3. Жуков В. В. Основы стойкости бетонов при действии повышенных и высоких температурах: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 437 с.
4. Пушенко А. С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2008. 217 с.
5. Hoff G. C. The use of fibre-reinforced concrete to hydraulics structural and marine environments // Fibre reinforced cement and concrete. Rilem symposium. London, 1985. Pp. 395–418.
6. De Larrard F. A method for proportioning high strength concrete mixtures // Cement, concrete and aggregates, ASTM. 1990. Vol. 12, No. 2. Pp. 47–52.
7. Markovic I. High-Performance Hybrid-Fibre Concrete – Development and Utilisation. Technische Universiteit Delft, Ph.D thesis. 16 January 2006.
8. Naaman A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement composites // Journal of advanced concrete technology. 2003. Vol. 1, No 3. Pp. 241–252.
9. Колбасников Н. Г. Физические основы прочности и пластичности металлов. СПб.: СПбГПУ, 2004. 266 с. URL: http://scask.ru/htm/book_rbt/1/146.gif
10. Капустин Д. Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 212 с.
11. Dorf V., Krasnovskiy R., Kapustin D., Sulygova P., Umnyakova N. Influence of Fiber Content on the Conductivity of Steel Fiber-reinforced Concrete // Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). Proceedings 2nd International Workshop. June 6–7. 2018. Moscow, Russia / American Concrete Institute. ACI Special Publication 2018–June (SP-326-62). Pp. 62.1–62.8.
12. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Сулыгова П. С. Эффект пуццоланизации при высоких температурах высокопрочной цементно-песчаной

² МИ 11–87. Методические указания. ГСИ. Прочностные и деформационные характеристики бетонов при одноосном кратковременном статическом сжатии и растяжении. Методика выполнения измерений / НПО «ВНИИФТРИ». М., 1987.

матрицы сталефибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 178–183.

13. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 12–17.

14. Красновский Р. О., Почтовик Г. Я. О механизме деформирования растянутого армированного бетона // Бетон и железобетон. 1962. № 5. С. 201–206.

15. Dorf В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Горбунов И. А., Нуриев Р. Р. Скорость распространения ультразвука в сталефибробетонах с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2014. № 3. С. 5–8.

16. 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.

17. Голямина И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.

18. Физическая акустика: пер. с англ.; под ред. У. Мэсона. Т. 1, часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований. М.: Мир, 1966. 592 с.

19. Dorf В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Рогачев К. В., Горбунов И. А., Денисов А. В. Влияние типа и содержания стальной фибры на прочностные характеристики сталефибробетонов с цементно-песчаной матрицей // Сб. науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону «Бетон и железобетон — взгляд в будущее» (12–16 мая 2014 г.): в 7 т. Т. III. М.: НИУ МГСУ, 2014. С. 140–150.

References

1. Milovanov A. F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsey pri pozhare* [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1998, 296 p.

2. Nekrasov K. D., Zhukov V. V., Gulyaeva V. F. *Tyazhelyy beton v usloviyakh povyshennykh temperatur* [Heavy weight concrete in conditions of elevated temperatures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 128 p.

3. Zhukov V. V. *Osnovy stoykosti betonov pri deystvii povyshennykh i vysokikh temperaturakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Fundamentals of concrete resistance under the action of elevated and high temperatures. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1981, 437 p.

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

5. Hoff G. C. *The use of fibre-reinforced concrete to hydraulics structural and marine environments*. Fiber reinforced cement and concrete. Rilem symposium. London, 1985, pp. 395–418.

6. De Larrard F. A method for proportioning high strength concrete mixtures. *Cement, concrete and aggregates*, ASTM, 1990, vol. 12, no. 2, pp. 47–52.

7. Markovic I. *High-performance hybrid-fibre concrete – development and utilisation*. Technische Universiteit Delft Publ., Ph.D thesis. 16 January, 2006.

8. Naaman A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement composites. *Journal of advanced concrete technology*, 2003, vol. 1, no 3, pp. 241–252.

9. Kolbasnikov N. G. *Fizicheskie osnovy prochnosti i plastichnosti metallov* [Physical bases of strength and plasticity of metals]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2004, 266 p. Available at: http://scask.ru/htm/book_rbt/1/146.gif

10. Kapustin D. E. *Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki nesemnoy stalefibrobetonnoy opalubki kak nesushchego ehlementa zhelezobetonnykh konstruktsey*. 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.

11. Dorf V., et al. *Influence of Fiber Content on the Conductivity of Steel Fiber-reinforced Concrete*. Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). Proc. of the 2-nd Int. workshop, June 6–7, 2018. Moscow. Russia. American Concrete Institute. ACI Special Publication 2018–June (SP-326-62), pp. 62.1–62.8.

12. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sultygova P. S. *Ehffekt 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.

13. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A. *Vyazkost' razrusheniya vysokoprochnogo betona posle vozdeystviya vysokoy temperatury* [Failure viscosity of high-strength concrete after exposure to high temperature]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2017, no. 11, pp. 12–17.

14. Krasnovskiy R. O., Pochtovik G. Ya. *O mekhanizme deformirovaniya rastyanutogo armirovannogo betona* [On the mechanism of deformation of the stretched reinforced concrete]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1962, no. 5, pp. 201–206.

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

16. 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.

17. Golyamina I. P. *Ul'trazvuk. Malen'kaya ehntsiklopediya* [Ultrasound. Brief encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya ehntsiklopediya Publ., 1979, 400 p.

18. *Fizicheskaya akustika* [Physical acoustics]. Transl. from English by Mehzon U. Vol. 1, pt. A. *Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy* [Methods and devices for ultrasonic research]. Moscow, Mir Publ., 1966, 592 p.

19. Dorf V. A., et al. *Vliyanie tipa i sodержaniya stal'noy fibry na prochnostnye kharakteristiki stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of type and content of steel fiber on the strength characteristics of steel-fiber concrete with cement-sand matrix]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee» (12–16 maya 2014 g.)* [Proc. of the III All-Russia (II Int.) sci. conf. on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete the future prospects” (May 12–16, 2014)]. In seven vols. Vol. III. Moscow, NIU MGSU Publ., 2014, pp. 140–150.