УДК 666.97.620.1

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

(АО «Институт «Оргэнергострой»)

E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук, доцент

© Д. В. Зайцев, аспирант

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)

E-mail: kde90@bk.ru, dannil5@mail.ru

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

(Ингушский государственный университет)

E-mail: sultygova@yandex.ru

© П. В. Травкин, инженер

(АО «Институт «Оргэнергострой»)

E-mail: travnik2008@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-50-57

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

(CJSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© D. V. Zaytsev, post-graduate student

(Moscow State National Research University of Civil Engineering)

E-mail: kde90@bk.ru, dannil5@mail.ru

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

(Ingush State University)

E-mail: sultygova@yandex.ru

© P. V. Travkin, engineer

(CJSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: travnik2008@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В СТАЛЕФИБРОБЕТОНЕ

THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON THE SPEED OF ULTRASOUND PROPAGATION IN STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

Рассматриваются результаты воздействия высоких температур при пожаре на изменение скорости распространения ультразвука в сталефибробетонах с высокопрочной цементно-песчаной матрицей и фиброй разной прочности и вида при различном ее содержании. Показано, что в диапазоне температур от 20 до 1100 °С скорость распространения ультразвука в сталефибробетонах мало зависит от наличия фибры и в основном определяется изменением характеристик матрицы под воздействием температуры. Влияние вида фибры и ее содержания проявляется только при температуре 500–600 °С и определяется степенью анкеровки фибры в матрице.

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

The article presents the study results of high temperatures impact in conditions of fire on the change in the ultrasound propagation velocity in steel fiber reinforced concrete with high-strength cement-sand matrix and fiber of different strength values and types at different contents. It is demonstrated that in the temperature range from 20 to 1100 °C, the ultrasound propagation velocity in steel fiber concrete scarcely depends of the presence of fiber and is mainly determined by the change in the characteristics of the matrix under the temperature exposure. The influence of the type and content of fiber is manifested only at a temperature of 500–600 °C and is determined by the degree of anchoring of fiber in the matrix.

Keywords: steel fiber concrete, ultrasound propagation velocity, cement-sand matrix, effects of high temperatures, fire.

Скорость распространения ультразвука в материале можно рассматривать как инструмент для оценки структурных изменений, возникающих в нем под воздействием различных внешних факторов.

Из литературы известно, что скорость распространения ультразвука в бетоне уменьшает-

ся с ростом температуры нагрева, что обусловлено происходящими при этом изменениями его структуры в результате деструктивных процессов. Так, при температуре:

- 60...90 °С происходит потеря массы бетона, вызванная испарением воды, и дегидратация этtringита [1–3];

- 100 °C — потеря массы цементного камня вследствие выпаривания свободной воды из пор цементного камня и кристаллизация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [1, 2]¹;

- 200 °C — полностью обезвоживаются поры цементного камня и, как следствие, исчезают силы поверхностного натяжения менисков поровой воды² [2–3];

- 300 °C — в цементном камне имеют место температурно-усадочные деформации, которые вызывают появление в нем микротрещин [1];

- 400...590 °C — удаляется кристаллизационная вода и происходит дегидратация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [1, 2];

- 550...600 °C — происходит трансформация кварца. Эта температура считается границей структурной целостности цементного камня³ [4];

- 750...800 °C — потеря кристаллизационной воды в результате дегидратации гидрата силиката кальция (C-S-H) [14], гашение свободной извести [1], расщепление доломита, увеличивается пористость цементного камня;

- 1000...1100 °C — потеря прочности до 90 %, бетон становится хрупким, модуль упругости при сжатии снижается до 2–10 МПа, коэффициент Пуассона — до 0,01 [5].

Следует отметить, что приводимые в литературе результаты исследований по воздействию высоких температур на сталефибробетон (СФБ) были, как правило, получены на СФБ с малым процентом фибрового армирования (не более 1,5 % по объему), классах прочности матрицы на сжатие не более В40 и при одном виде фибры.

Нами были выполнены исследования прочностных и деформационных характеристик СФБ с высокопрочной матрицей, с разными видами фибры и с фибровым армированием от 0,5 до 6,0 % при нормальных [6] и повышенных [7] температурах.

Исследования при нормальных температурах показали, что скорость распространения ультразвука в СФБ практически не зависит от вида фибры и ее содержания [8]. Этот факт может быть объяснен эффектами поглощения, рассеивания и отражения ультразвука на границе сред [9]

(в данном случае цементно-песчаной матрицы и включенных в нее волокон фибры и/или продуктов пуццоланизации в порах цементного камня).

Рассмотрим результаты исследования влияния вида фибры и ее содержания на изменение скорости ультразвука в СФБ при воздействии высоких температур при пожаре.

Исследования выполняли, нагревая образцы по стандартному для пожара целлюлозному режиму по ГОСТ 30247.0–94⁴ при пределе огнестойкости R120, которому соответствует нагрев $T - T_0 = 1029$ °C в течение 120 мин со скоростью, описываемой зависимостью

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

где T — температура в печи, соответствующая времени t , °C; T_0 — температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °C; t — время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Для исключения влияния характеристик матрицы исследования были выполнены на СФБ с высокопрочной цементно-песчаной самоуплотняющейся матрицей одного и того же состава (табл. 1).

Введение в состав матрицы микрокремнезема и пластификатора приводит к тому, что в диапазоне температур от 20 до 200 °C проходит реакция пуццоланизации, т. е. взаимодействие в присутствии влаги порошкообразных силикатных и алюмосиликатных веществ с гидроксидом кальция. Продукты реакции заполняют и кольматируют поры в цементно-песчаной матрице, повышая ее плотность. При этом увеличивается значение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины [10], что свидетельствует о повышении сопротивления образованию и развитию трещин за счет происходящего при этих температурах повышения прочности как матрицы, так и СФБ на ее основе за счет лучшего сцепления матрицы с волокнами фибры.

Для исследования было выбрано пять видов фибры (табл. 2).

Содержание фибры в матрице по объему варьировали от 0 до 6 %. Исключение составлял только СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3, так как при содержании этой фибры более 1,5 % ее волокна

¹ ACI Committee 544. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. (Title No. 70-65) // A.C.I. Journal. Proceedings. Vol. 70, No. 11 (November 1973). Pp. 729–744.

² Там же.

³ Там же.

⁴ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

Таблица 1

Состав цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов

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

Таблица 2

Характеристики фибры

Название фибры	Вид 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
ФСРП 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

при перемешивании сталефибробетонной смеси сцеплялись друг с другом, образуя «ежи».

Исследования проводили на образцах в форме пластин длиной 260 мм и шириной 60 мм при их толщине 30 мм. Такие размеры образцов обеспечивали их равномерный прогрев в печи. Каждая серия состояла не менее чем из трех образцов.

В образцах до нагревания при нормальной температуре (20 ± 2) °С и после нагрева до заданной температуры с последующим остыванием до нормальной температуры измеряли скорость ультразвука на базе 120 мм, используя ультразвуковые преобразователи с коническими концентраторами.

Результаты экспериментов приведены на рис. 1 и 2.

Из приведенных диаграмм изменения скорости ультразвука (см. рис. 2) видно, что:

- диаграммы «температура нагрева — скорость ультразвука» матрицы и СФБ имеют S-образный характер с монотонным снижением скорости ультразвука с ростом температуры;

- скорость распространения ультразвука в СФБ относительно мало зависит от вида фибры и процента армирования и близка к его скорости в матрице;

- на диаграммах можно выделить три участка, заключенных соответственно в диапазонах температур от 20 до 300 °С, от 300 до 800 °С и от 800 до 1100 °С. На первом участке диаграмм (от 20 до 300 °С) имеет место незначительное (примерно 11 %) равномерное снижение скорости ультразвука. При этом не отмечается изменения характера процесса вследствие повышения прочности матрицы в результате пуццоланизации⁵. На втором участке диаграмм (от 400 до 800 °С) получено снижение скорости ультразвука примерно в два раза по сравнению с начальной (как для матрицы, так и для СФБ). На третьем участке диаграмм (от 800 до 1100 °С) скорость ультразвука практически не изменяется и находится в пределах от 1600 до 1700 м/с.

Степень влияния на скорость распространения ультразвука в СФБ вида фибры и ее содержания можно оценить также, анализируя зависимости изменения относительной разности скоростей ультразвука в СФБ и матрице от температуры нагрева $\langle T - (c_{fb} - c_m) / c_m \rangle$.

На диаграммах (рис. 3) изменения относительной разности $(c_{fb} - c_m) / c_m$ скоростей ультразвука в СФБ (c_{fb}) и матрице (c_m) можно выделить

⁵ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

Рис. 1. Зависимость от температуры скорости ультразвука в матрице и СФБ при содержании фибры по объему, %: а — 0,5; б — 1,0; в — 1,5; г — 3,0; д — 6,0

два участка: с содержанием фибры от 0,5 до 1,5 % и от 1,5 до 6,0 %:

- на первом участке (до 1,5 %) в зависимости от вида фибры разница в скоростях ультразвука имеет как положительный, так и отрицательный знак;
- на втором участке (от 1,5 до 6,0 %) скорость ультразвука в СФБ меньше, чем в матрице, при всех температурах нагрева, кроме температуры 600 °C (рис. 3, д), при которой скорость ультра-

звука в СФБ выше его скорости в матрице (на 5–20 % в зависимости от вида фибры).

На рис. 3 четко видно, что начиная с содержания фибры 1,5 % в диапазоне температуры от 500 до 700 °C скорость ультразвука в СФБ начинает превышать скорость ультразвука в матрице с максимумом при 600 °C, где превышение составило 20 %. Этот результат можно объяснить происходящими одновременно следующими процессами. В диапазоне температур 400–500 °C

Рис. 2. Зависимость от содержания фибры отношения разности скоростей ультразвука в СФБ и матрице (c_{fb}) к скорости ультразвука в матрице (c_m) при температуре, °C: а — 20; б — 110; в — 200; г — 400; д — 600; е — 800; ж — 1100

Рис. 3. Зависимость от температуры нагрева отношения разности скоростей ультразвука в СФБ и матрице при содержании фибры по объему, %: а — 0,5; б — 1,0; в — 1,5; г — 3,0; д — 6,0

из матрицы удаляется кристаллизационная вода и происходит дегидратация цементного камня. В диапазоне температур 550–600 °С происходит трансформация кварца — мелкого заполнителя, что совместно с дегидратацией цементного камня приводит к снижению прочности и модуля упругости цементно-песчаной матрицы и, следо-

вательно, и скорости ультразвука. Температура 600 °С считается границей структурной целостности матрицы на портландцементе [11].

Одновременно при температуре выше 400 °С вследствие пластических деформаций стали начинается снижение прочности металла фибры [12]. Однако скорость ультразвука в СФБ с фи-

брой ФСПВ 30×0,8, ФСЛ 40×0,8 и Harex 32×1,2 при температуре выше 600 °С остается выше его скорости в матрице. Это свидетельствует о том, что прочность фибры не падает до нуля, а ультразвук распространяется по волокнам фибры [8], поскольку в матрице из-за нарушения ее структуры возникают участки с макротрещинами. Скорость же ультразвука в металле выше, чем в цементном камне.

Можно предположить, что прочность фибры не падает до нуля, поскольку дегидратированная матрица имеет более низкий коэффициент тепло- и температуропроводности [13, 14], в результате чего температура фибры меньше приложенной.

Зависимость превышения скорости ультразвука в СФБ над скоростью в матрице от вида фибры можно также объяснить влиянием степени ее анкеровки в матрице. Исходя из полученных данных она наиболее высокая у фибры Harex 32×1,2 с анкерами в виде крючков, существенно меньше у волнистой фибры из проволоки ФСПВ 30×0,8 и еще меньше у строганной из листа фибры переменного профиля ФСЛ 40×0,8. Исключением явилась гладкая из проволоки фибра ФСПА 30×0,3, имеющая анкера по концам. Снижение скорости ультразвука здесь имеет место уже при температуре 200–300 °С, что свидетельствует о проскальзывании волокон этой фибры.

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

- имеющиеся в литературе данные о влиянии нагрева бетона до 1100 °С могут быть распространены на сталефибробетоны с высокопрочной цементно-песчаной матрицей и стальной фиброй;

- диаграммы «температура нагрева — скорость ультразвука» матрицы и СФБ имеют S-образный характер с монотонным снижением скорости ультразвука с ростом температуры;

- после нагрева при пожаре ультразвук в СФБ распространяется в основном по цементно-песчаной матрице (как и при нормальной температуре);

- ультразвуковой метод может быть успешно применен при оценке степени повреждения ста-

лефибробетонных конструкций, подвергшихся воздействию высоких температур при пожаре;

- деструктивные процессы, происходящие под воздействием температуры, приводят к изменению (в основном к уменьшению) скорости распространения ультразвука в матрице и сталефибробетонах;

- разный характер снижения скорости ультразвука для разных диапазонов температуры является следствием развития под воздействием возрастающей температуры различных по своей природе деструктивных процессов (потеря свободной воды, дегидратация цементного камня, трансформация кварца, образование микротрещин и трещин);

- влияние вида фибры на скорость распространения ультразвука в СФБ сказывается незначительно и в основном в диапазоне температуры 500–700 °С (за исключением фибры ФСПА 30×0,3, где оно имеет место при температурах 200–300 °С) и определяется степенью анкеровки фибры в цементно-песчаной матрице.

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. Balázs G. L., Lublóy É. Reinforced concrete structures in and after fire // Concrete structures. 2012. Vol. 13. Pp. 72–80.
4. Delplace G., Hajar Z., Simon A., Cliaut S., Weizmaun L. Precast thin UHPFRC curved shells in a waste water treatment plant / In: Toutlemonde F., Resplendino J., eds. Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. October 1–3, 2013, Marseille, France. Pp. 49–58.
5. Пушенко А. С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2008. 217 с.
6. Капустин Д. Е. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий конструктивный элемент железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 282 с.
7. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П. С. Влияние характеристик стальной фибры и ее содержания в сталефибробетоне на его огнестойкость // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 38–46.

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

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

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

11. Demirel B., Keleştemur O. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume // Fire Safety Journal. November 2010. Vol. 45 (6). Pp. 385–391.

12. Колбасников Н. Г. Физические основы прочности и пластичности металлов. СПб.: СПбГПУ, 2004. 268 с.

13. Lea F. C., Stradling R. The resistance to fire of concrete and reinforced concrete // Engineering. 1922. Vol. 114 (2959). Pp. 341–344, 380–382.

14. Petzold A., Röhrs M. Concrete for high temperatures. London: Maclaren and Sons Ltd., 1970. 190 p.

References

1. Milovanov A. F. Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsiy 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 temperature [Heavy concrete in conditions of high temperatures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 128 p.

3. Balázs G. L., Lublós É. Reinforced concrete structures in and after fire. *Concrete structures*, 2012, vol. 13, pp. 72–80.

4. Delplace G., et al. Precast thin UHPFRC curved shells in a waste water treatment plant. *Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance of Fiber-Reinforced Concrete*. October 1–3, 2013, Marseille, France, pp. 49–58.

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

6. Kapustin D. E. Nesemnaya stalefibrobetonnaya opalubka kak nesushchiy konstruktivnyy ehlement zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy AEhS. Diss. kand. tekhn. nauk [Non-removable steel-fiber concrete formwork as a bearing structural element of reinforced concrete structures of NPP buildings and structures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2016, 282 p.

7. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sulygova P. S. Vliyanie kharakteristik stal'noy fibry i ee soderzhaniya v stalefibrobetone na ego ognestoykost' [The effect of the properties and content of steel fiber in steel fiber reinforced concrete on fire endurance]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 38–46.

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

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

10. Leonovich S. N., Litvinovskiy D. A. Vyazkost' razrusheniya vysokoprochnogo betona po mere vozdeystviya vysokoy temperature [Fracture viscosity of high-strength concrete at the impact of high temperature]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2017, no. 11, pp. 12–17.

11. Demirel B., Keleştemur O. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*, November 2010, vol. 45 (6), pp. 385–391.

12. Kolbasnikov N. G. Fizicheskie osnovy prochnosti i plastichnosti metallov [Physical basics of strength and plastic properties of metals]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2004, 268 p.

13. Lea F. C., Stradling R. The resistance to fire of concrete and reinforced concrete. *Engineering*, 1922, vol. 114(2959), pp. 341–344, 380–382.

14. Petzold A., Röhrs M. Concrete for high temperatures. London, Maclaren and Sons Ltd. Publ., 1970, 190 p.