УДК 666.97.620.1

© В. А. Dorf, канд. техн. наук, зам. ген. директора

© Р. О. Красновский, канд. техн. наук

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук

(АО «Институт «Оргэнергострой»)

E-mail: dorfva@ioes.ru, krasnovskijro@ioes.ru,
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 10.23968/1999-5571-2020-17-1-150-155

© V. A. Dorf, PhD in Sci. Tech., Deputy CEO

© R. O. Krasnovskij, PhD in Sci. Tech.

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech.

(JSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: dorfva@ioes.ru, krasnovskijro@ioes.ru,
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 ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОВ С ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ МАТРИЦЕЙ

THE CHANGE IN IMPERMEABILITY OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE WITH HIGH STRENGTH CEMENT-SAND MATRIX AT HEATING

Рассматриваются результаты воздействия высоких температур при пожаре на изменение водонепроницаемости сталефибробетонных с высокопрочной цементно-песчаной матрицей и различным содержанием фибры разного вида, размеров и прочности. Показано, что в диапазоне температур от 20 до 1100 °C диаграммы «температура нагрева — марка по водонепроницаемости» матрицы и СФБ имеют S-образный характер, с резким снижением водонепроницаемости после нагрева более 100 °C.

Ключевые слова: сталефибробетон, воздействие высоких температур, водонепроницаемость.

The paper considers the effects of high temperatures in case of fire on the change in impermeability of steel fiber reinforced concrete having a high-strength cement-sand matrix and various content of fiber of different types, sizes, and strength. It is shown that in the temperature range from 20° to 1100° C in the diagram “Heating temperature — impermeability class», the matrix and steel fiber concrete(SFC) have a S-shaped character, and in case of heating temperature of over 100 °C, there comes a distinct decrease in impermeability.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, exposure to high temperatures, impermeability.

В процессе эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций с несъемной сталефибробетонной (СФБ) опалубкой она защищает бетон и арматуру железобетонных конструкций в их эксплуатации от воздействия окружающей среды, выполняя, в том числе, функции гидроизоляции. В последнем случае степень защиты характеризуется маркой СФБ по водонепроницаемости, определяемой по ГОСТ 12730.5–84

«Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

По данным немногочисленных исследований, выполненных при нормальной температуре (20 ± 5 °C), марка по водонепроницаемости самоуплотняющихся бетонов (СУБ) и СФБ достаточно высокая и составляет не менее W12 для СУБ и W20 для СФБ [1–4]. Следует отметить, что приведенные значения марок связаны с предель-

ными возможностями использовавшегося в этих исследованиях испытательного оборудования.

Информации об изменении марки СФБ по водонепроницаемости после нагрева найти не удалось. Известно лишь, что в бетоне после его нагрева [5–9] начиная с температуры 300 °С появляются микротрещины, в то время как в СФБ (при содержании фибры 1 %) микротрещины возникают лишь при 600 °С [9]. В [9] получено, что в диапазоне температур от 300 до 800 °С сквозная пористость бетонов и СФБ существенно увеличивалась, а по достижении 1000 °С — снижалась, тогда как максимальный размер пор монотонно возрастал в диапазоне от 300 до 1000 °С.

Нами были проведены эксперименты по оценке водонепроницаемости СФБ после воздействия высоких температур. Исследованные СФБ имели матрицу одного и того же состава (табл. 1) и отличались (табл. 2) видом фибры и ее содержанием.

Объемное количество фибры изменяли от 0 до 6 %, кроме фибры ФСПА 30×0,3, максимум объема которой составил 1,5 %, потому что при большем количестве при перемешивании СФБ смеси ее волокна цеплялись друг за друга с образованием комков.

Испытательные образцы были изготовлены в форме пластин 260×60 мм, $h = 20$ мм, что обеспечивало их равномерный прогрев и исключало

растрескивание. Каждая серия состояла минимум из трех образцов.

Водонепроницаемость определяли ускоренным методом по воздухопроницаемости по методике ГОСТ 12730.5–84 с помощью прибора ВВ-2¹ с пределом определения марки по водонепроницаемости W20. Учитывая размеры образцов, прибор улучшили, герметично прикрепив к его днищу стальную диафрагму с отверстием $\varnothing 16,5$ мм. В градуировочную зависимость внесли изменения согласно указаниям стандарта.

Образцы нагревали в муфельной электропечи до температуры 110, 200, 400, 600, 800 и 1100 °С по стандартному режиму (ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования») для целлюлозного пожара.

После нагрева до заданной температуры образцы остывали вместе с печью до нормальной температуры. Визуальный осмотр образцов после остывания показал отсутствие на них каких-либо поверхностных трещин и отколов. После этого определяли марку по водонепроницаемости в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора ВВ-2.

Графики изменения марки по водонепроницаемости матрицы и СФБ в зависимости от температуры нагрева приведены на рис. 1.

Получено, что диаграммы «марка по водонепроницаемости — температура нагрева» матрицы и СФБ, независимо от наличия фибры, ее вида и содержания, имеют одинаковый S-образный характер. При этом на них в общем случае можно выделить три участка:

¹ ВВ-2. Устройство для ускоренного определения водонепроницаемости бетона. Руководство по эксплуатации ИТЦ 192 00. 000 РЭ.2018.

Таблица 1

Состав цементно-песчаной матрицы

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

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 15×0,3		15	0,3	2450
ФСПА 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. 1. Зависимость от температуры нагрева водонепроницаемости матрицы и СФБ с содержанием фибры (по объему):
а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

- в диапазоне температуры от $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ до 110°C водонепроницаемость матрицы и СФБ, в основном, оставалась постоянной либо водонепроницаемость СФБ была ниже, чем у матрицы;
- в диапазоне температуры от 110 до 600°C введение фибры существенно снижало водонепроницаемость СФБ, в том числе по сравнению с матрицей (особенно это характерно для диапазона от 400 до 600°C);
- в диапазоне температуры от 600 до 1100°C водонепроницаемость матрицы снижалась до нуля уже при температуре 800°C , а водонепроницаемость СФБ была или равна или больше (в диапазоне температуры от 600 до 800°C), чем у матрицы.

Взаимосвязь между маркой по водонепроницаемости матрицы и СФБ более четко видна на диаграммах (рис. 2) изменения от температуры нагрева относительной разности между марками по водонепроницаемости СФБ (W_{fb}) и матрицы (W_m): $(W_{fb} - W_m) / W_m$ (в %).

Видно, что разность значений марок по водонепроницаемости СФБ и матрицы на рассмотренном диапазоне температуры нагрева не превышает 10 %, чем с инженерной точки зрения можно пренебречь.

Одинаковые значения марки по водонепроницаемости (W_{20}) в диапазоне температуры от 25 до 110°C следует, в первую очередь, объяснить ограниченными возможностями прибора ВВ-2, как и большинства типов стандартизированных приборов, предназначенных для определения водонепроницаемости бетонов.

Снижение водонепроницаемости матрицы в диапазоне температуры от 25 до 400°C связано с испарением из пор цементного камня свободной воды [5–7, 9].

Как показали наши исследования, потеря свободной воды приводит к потере массы и уменьшению плотности матрицы и СФБ, и снижение этих характеристик происходит по линейному закону [10], тогда как диаграммы «марка по водонепроницаемости — температура нагрева» имеют S-образный характер. Это, по-видимому, связано с тем, что в диапазоне температуры от 400 до 600°C химически связанная вода переходит в перегретый пар с образованием открытых микрокапилляров, который через них удаляется из матрицы. С учетом сказанного возникает во-

прос, насколько корректна установленная ГОСТ 12730.5–84 и, соответственно, инструкцией по эксплуатации прибора ВВ-2 зависимость, связывающая водонепроницаемость цементного бетона с его воздухопроницаемостью в случае наличия микрокапиллярной пористости.

В диапазоне температуры от 600 до 1100°C снижение марки по водонепроницаемости обусловливается разрушением цементного камня с образованием микротрещин.

Различие марок по водонепроницаемости матрицы и СФБ может быть связано с рядом причин.

Снижение после нагрева водонепроницаемости СФБ можно объяснить тем, что в результате более высокого значения коэффициента температурного расширения волокон стальной фибры по сравнению с цементно-песчаной матрицей они при нагреве способствуют раскрытию микротрещин и, следовательно, снижают водонепроницаемость СФБ. Превышение же марки по водонепроницаемости СФБ над маркой матрицы может быть связано с тем, что волокна фибры, вследствие их заанкерования в матрице, сдерживают раскрытие в ней микротрещин и, следовательно, повышают водонепроницаемость.

Результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

Изменение при нагреве водонепроницаемости СФБ с цементно-песчаной матрицей в основном определяется потерей цементным камнем всех видов свободной и химически связанной воды. Стальная фибра в зависимости от ее вида, процента фибрового армирования и температуры нагрева может в определенной степени влиять на марку СФБ по водонепроницаемости.

Поскольку изменение водонепроницаемости СФБ связано как с потерей воды из пор цементного камня, так и с образованием микротрещин в цементно-песчаной матрице, то целесообразно провести исследование этих процессов. Это, в свою очередь, вызывает необходимость:

- разработки испытательного оборудования, обеспечивающего возможность определения водонепроницаемости большей, чем W_{20} ;
- установления зависимости между водонепроницаемостью и воздухопроницаемостью цементных бетонов с относительно большим объемом микрокапилляров.

Рис. 2. Зависимость от температуры нагрева относительного изменения разности марок по водонепроницаемости СФБ и матрицы при содержании в СФБ волокна (по объему): а — 0,5 %; б — 1,0 %; в — 1,5 %; г — 3,0 %; д — 6,0 %

Библиографический список

1. Латыпов М. М., Струговец И. Б., Бабков В. В., Недосеко И. В. Фибробетон в производстве дорожных плит // *Строительные материалы*. 2009. № 11. С. 50–51.
2. Баранов И. М., Юсупов Р. К., Тарасов А. С., Солдатова Н. И. Реальности и перспективы повышения прочности особопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2013. № 11. С. 50–53.
3. Dorf V. A., 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.
4. Бикбау М. Я., Хуснутдинов А. М. Литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси и бетоны нового поколения на основе наноцементов // *Технологии бетонов*. 2019. № 9–10 (158–159). С. 24–33.
5. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998. 296 с.
6. Некрасов К. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
7. Жуков В. В. Основы стойкости бетонов при действии повышенных и высоких температурах: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 437 с.
8. Пушенко А. С. Высокопрочный бетон в условиях воздействия высоких температур при пожаре: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2008. 217 с.
9. Lau A. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers: Dissertation theses, The Hongkong polytechnic university, 2003. URL: <http://hdl.handle.net/10397/3456>.
10. 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.

References

1. Latypov M. M., Strugovets I. B., Babkov V. V., Nedoseko I. V. *Fibrobeton v proizvodstve dorozhnykh plit* [Fiber reinforced concrete in the production of road slabs]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2009, no. 11, pp. 50–51.
2. Baranov I. M., Yusupov R. K., Tarasov A. S., Soldatova N. I. *Real'nosti i perspektivy povysheniya*

prochnosti osoboprochnykh betonov [Realities and prospects for increasing the strength of extra-strength concrete]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2013, no. 11, pp. 50–53.

3. Dorf V. A., et al. *Vliyanie tipa i sodержaniya stal'noy fibry na prochnostnye kharakteristiki stalefibrobetonov s tsementno-peschanoy matritsey* [Influence of the type and content of steel fiber on the strength characteristics of steel-fiber concrete with a cement-sand matrix]. *Trudy III Vseros. (II Mezhdunar. conf.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee»* (12–16 maya 2014 g.) v 7 t. [Proc. of the III All-Russian (II Int.) conf. on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete — a look into the future” (May 12–16, 2014), in 7 vols.]. Vol. III. Moscow, NIU MGSU Publ., 2014, pp. 140–150.

4. Bikbau M. Ya., Khusnutdinov A. M. *Litye i samouplotnyayushchiesya betonnye smesi i betony novogo pokoleniya na osnove nanotsementov* [Pourable concrete mixes, self-compacting concrete mixes, and new-generation concretes based on nano-cement]. *Tekhnologii betonov – Concrete Technologies*, 2019, no. 9–10 (158–159), pp. 24–33.

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

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

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

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

9. Lau A. *Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers*. Diss. theses. The Hongkong Polytechnic University Publ., 2003. Available at: <http://hdl.handle.net/10397/3456>

10. Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E., Sul'tygova 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.