УДК 666.97.620.1

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-1-120-124

© В. А. Дорф, канд. техн. наук

© V. A. Dorf, PhD in Sci. Tech.

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

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

ст. научн. сотрудник

senior research worker

(АО «Институт «Оргэнергострой»)

(CJSC «Institute «Orgenergostroy»)

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

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

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

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

(Ингушский государственный университет)

(Ingush State University)

E-mail: sultygova@yandex.ru

E-mail: sultygova@yandex.ru

© Д. Е. Капустин, канд. техн. наук

© D. E. Kapustin, PhD in Sci. Tech.

(НИУ МГСУ, АО «Институт «Оргэнергострой»)

(NRU MGSU, CJSC «Institute «Orgenergostroy»)

E-mail: kde90@bk.ru

E-mail: kde90@bk.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE THERMAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

Представлены результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик сталефибробетона с высокопрочной цементно-песчаной матрицей и с различным содержанием фибры. Показано, что с увеличением объемного содержания фибры происходит снижение значений коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости, теплового потока и увеличение термического сопротивления.

Ключевые слова: сталефибробетон, теплопроводность, теплоемкость, стальная фибра, объемное содержание фибры.

The paper presents the results of experimental studies of the thermal and physical properties of steel fiber reinforced concrete with high-strength cement-sand matrix and variable fiber content. It is proved, that with an increase in the volume content of the fiber, there takes place a decrease in the values of thermal conductivity, specific heat capacity, and heat flow, and an increase in thermal resistance is observed.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, thermal conductivity, heat capacity, steel fiber, volumetric fiber content.

При расчете строительных конструкций на огнестойкость необходимо знание теплофизических характеристик бетона, таких как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость. Анализ литературных данных показывает, что число таких исследований применительно к сталефибробетону (СФБ) незначительно, поэтому при расчете используются стандартные справочные данные, в которых теплофизические характеристики указаны для тяжелого бетона

в целом, а СФБ при этом вообще не выделены в отдельную группу. В то же время известно [1], что физико-механические характеристики СФБ зависят от объемного содержания в нем фибры.

Нами были проведены исследования с целью определения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, удельной теплоемкости, величины теплового потока, термического сопротивления СФБ в зависимости от содержания в нем фибры. Испытания проводили на СФБ

с одним видом фибры (волнистая фибра ФСРВ 0,3×15, диаметром 0,3 мм и длиной 15 мм), содержание которой (по объему) в разных сериях было равно 1,5; 3,0 и 6,0 %. Матрица СФБ во всех сериях была одинаковой и представляла собой цементно-песчаный раствор, в состав которого были введены микрокремнезем и гиперпластификатор Sika 5-800. Расход компонентов матрицы был принят следующим: цемент 800 кг/м³, песок 1250 кг/м³, вода 260 кг/м³, микрокремнезем 45 кг/м³, гиперпластификатор 8 кг/м³.

Испытывали образцы в форме пластин 250×250×30 (высота h) мм. Волокна фибры в образцах были расположены параллельно большой грани.

Теплофизические характеристики определяли как для СФБ, так и для матрицы (содержание фибры 0 %).

Теплопроводность СФБ определяли при стационарном тепловом режиме по стандартизированной методике (ГОСТ 7076–99¹) на установке ПИТ 2.1 (рис. 1). Эта методика позволяет одновременно определять термическое сопротивление, тепловой поток и коэффициент теплопроводности. Тепловой поток был направлен перпендикулярно к наибольшим граням образца. В процессе испытания измеряли мощность, необходимую для создания теплового потока через образец, и температуру на противоположных гранях образца.

Перед испытанием образцы СФБ были высушены до постоянной массы.

Теплоемкость СФБ определяли по методике НИИСФ РААСН, которая предусматривает использование универсальной системы температурного мониторинга во времени. Эталонный образец с известной теплоемкостью (оптическое стекло) использовали наряду с исследуемыми образцами СФБ. При этом размеры образцов и эталона были одинаковыми. Образцы СФБ и эталон были снабжены запрограммированными контактными регистраторами температуры — термохронами, что позволяло вести регистрацию и обработку результатов с помощью компьютера. Термохроны приклеивали к образцам с помощью кремнийорганической теплопроводной пасты, которая обеспечивала эффективный

тепловой контакт между исследуемым образцом и регистратором температуры. На поверхность каждого образца (рис. 2) приклеивали по пять термохронов (в центре поверхности и по диагоналям).

Образцы помещали в прогретый до заданной температуры (+85 °С) сушильный шкаф, выдерживали при этой температуре в течение 4 ч, затем вынимали и охлаждали до комнатной температуры (+20 ± 2) °С, фиксируя затраченное на остывание время. Температуру регистрировали через определенные заданные нами заранее промежутки времени от 2 до 5 мин.

Теплоемкость СФБ C_{SFRC} рассчитывали по формуле:

Рис. 1. Установка ПИТ 2.1 для определения коэффициента теплопроводности с образцом

Рис. 2. Образцы из фибробетона и эталон с регистраторами температуры

¹ ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.

$$C_{SFRC} = C_{st} \frac{m_{st} t_{SFRC}}{m_{SFRC} t_{st}},$$

где C_{st} — коэффициент теплоемкости эталона, Дж/(кг · °C); m_{st} , m_{SFRC} — масса эталона и образца СФБ, кг; t_{st} , t_{SFRC} — время остывания эталона и образца СФБ, с.

По полученным результатам определения коэффициента теплопроводности λ_{SFRC} и удельной теплоемкости C_{SFRC} был рассчитан коэффициент температуропроводности:

$$a_{SFRC} = \frac{\lambda_{SFRC}}{C_{SFRC} \rho_{SFRC}},$$

где ρ_{SFRC} — плотность образца, кг/м³.

Полученные результаты экспериментов представлены в таблице и на рис. 2–7.

Из представленных данных видно, что с ростом содержания фибры μ_{fv} коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, удельная теплоемкость и плотность теплового потока уменьшаются, а термическое сопротивление увеличивается.

Из общих соображений можно предположить, что введение в цементно-песчаный раствор (матрицу) стальной фибры (материала с большей теплопроводностью) должно привести к увеличению коэффициента теплопроводности. Эта предпосылка реализуется в предложениях по расчету показателей теплопроводности, когда теплопроводность композитного материала рассчитывается, исходя из соответствующих характеристик отдельных компонентов и их содержания аналогично тому, как иногда рассчитывают модуль упругости бетона, исходя из двухкомпонентной модели, в которой каждый компонент может рассматриваться как полоса, расположенная вдоль или поперек действия силы (теплового

Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности СФБ λ_{SFRC} от содержания фибры μ_{fv}

Рис. 4. Зависимость теплового потока через СФБ q_{SFRC} от содержания фибры μ_{fv}

потока) либо в шахматном порядке [2]. При такой модели теплопроводность композитного материала должна быть выше, чем теплопроводность компонента с наименьшей теплопроводностью. Поэтому по результатам такого расчета, предлагаемого в [3], коэффициент теплопроводности СФБ должен быть больше, чем матрицы.

Однако в нашем случае он, наоборот, уменьшился, в том числе при увеличении содержания

Результаты эксперимента

Теплофизическая характеристика	Значение теплофизических характеристик при содержании фибры, %			
	0	1,5	3	6
Плотность образцов, кг/м ³	2242	2321	2381	2575
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)	1,065	0,889	0,871	0,814
Плотность теплового потока, Вт/м ²	173,89	140,95	138,55	125,33
Термическое сопротивление, м ² · °C/Вт	0,031	0,038	0,041	0,047
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °C)	969	920	903	859
Коэффициент температуропроводности, м ² /с	$4,904 \cdot 10^{-7}$	$4,164 \cdot 10^{-7}$	$4,053 \cdot 10^{-7}$	$3,682 \cdot 10^{-7}$

Рис. 5. Зависимость термического сопротивления СФБ R_{SFRC} от содержания фибры μ_{fv}

Рис. 6. Зависимость удельной теплоемкости СФБ C_{SFRC} от содержания фибры μ_{fv}

Рис. 7. Зависимость коэффициента температуропроводности СФБ a_{SFRC} от содержания фибры μ_{fv}

фибры. Аналогичные результаты (уменьшение коэффициента теплопроводности СФБ при возрастании содержания фибры) были получены и другими авторами [4].

Полученную закономерность можно объяснить одновременным изменением с ростом процента фибрового армирования пористости матрицы и длины пути теплового потока.

Так, с увеличением содержания в СФБ фибры увеличивается количество крупных пор за счет захвата фиброй воздуха в процессе перемешивания смеси. Интенсивность этого процесса, как показали наши эксперименты, зависит от вида фибры и процента фибрового армирования [5].

Изменение пути теплового потока, как и при распространении ультразвука [6] (поскольку оба процесса имеют волновой характер), связано с эффектом отражения и рассеивания на границе сред «матрица — волокно фибры». Тепловой поток распространяется по матрице в обход волокон фибры, что эквивалентно увеличению длины каналов теплопроводности. В результате теплопроводность уменьшается. В частности, для рассматриваемого СФБ с фиброй ФСПВ 0,3×15 снижение скорости ультразвука составило 3 % по сравнению с его скоростью в матрице [6].

Сравнение теплофизических характеристик СФБ с объемным содержанием фибры 6 % с аналогичными для матрицы (0 % фибры) показало, что коэффициенты теплопроводности и температуропроводности уменьшились в 1,3 раза, а термическое сопротивление увеличилось в 1,5 раза, что свидетельствует об улучшении теплозащитных качеств СФБ с ростом фибрового армирования.

Из представленных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- теплофизические свойства СФБ с высокопрочной цементно-песчаной матрицей зависят от содержания в нем фибры;
- с увеличением объемного содержания фибры происходит снижение значений коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, удельной теплоемкости, теплового потока и увеличение термического сопротивления СФБ.

Использование полученных закономерностей изменения теплофизических характеристик СФБ позволит проводить более корректный расчет конструкций на огнестойкость [7].

Библиографический список

1. Коледа Е. А., Леонович С. Н., Латыш А. В. Анализ физико-механических характеристик сталефибробетона // Материалы XX междунар. науч.-метод. семинара «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инже-

нерных кадров», 17–19 февраля 2016 г. Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2016. С. 248–253.

2. Довжик В. Г., Дорф В. А., Петров В. П. Технология высокопрочных керамзитобетонов. М.: Стройиздат, 1976. 136 с.

3. Назиров Р. А., Волков А. Н. Теоретический расчет теплофизических свойств цементных бетонов с использованием теплоемкого заполнителя // Вестник ТГАСУ. 2014. № 2. С. 150–155.

4. Balázs Nagy, Salem Georges Nehme, Dóra Szagri. Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes // 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. Energy Procedia. 2015. Vol. 78. Pp. 2742–2747.

5. Дорф 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 // Науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону «Бетон и железобетон — взгляд в будущее». М., 2014. С. 140–150.

6. Дорф 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.

7. Dorf V., Krasnovskiy R., Kapustin D., Sulytsova 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. 621–628.

References

1. Koleda E. A., Leonovich S. N., Latysh A. V. Analiz fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik stalefibrobetona [Analysis of the physical and mechanical characteristics of steel fiber reinforced concrete]. Trudy XX mezhdunar. nauch.-metod. seminar «Perspektivnye napravleniya

innovatsionnogo razvitiya stroitel'stva i podgotovki inzhenernykh kadrov», 17–19 fevralya 2016 g. Grodno [Proc. of the XX sci.-method. workshop “Perspective directions of innovative development of construction and engineering training”, February 17–19, 2016, Grodno]. Yanko Kupala State University of Grodno Publ., 2016, pp. 248–253.

2. Dovzhyk V. G., Dorf V. A., Petrov V. P. Tekhnologiya vysokoprochnykh keramzitobetonov [Technology of high-strength expanded clay concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, 136 p.

3. Nazirov R. A., Volkov A. N. Teoreticheskiy raschet teplofizicheskikh svoystv tsementnykh betonov s ispol'zovaniem teploemkogo zapolnitelya [Theoretical calculation of thermal properties of cement concrete with the use of thermal filler]. Vestnik TGAU – Bulletin of TGAU, 2014, no. 2, pp. 150–155.

4. Balázs Nagy, Salem Georges Nehme, Dóra Szagri. Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes. 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. Energy Procedia, 2015, vol. 78, pp. 2742–2747.

5. Dorf V. A., et al. Vliyanie tipa i soderzhaniya 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 cement-sand matrix]. Trudy III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton — vzglyad v budushchee» [Proc. of the III All-Russian conf. (II Int. conf.) on concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete — a look into the future”]. Moscow, 2014, pp. 140–150.

6. Dorf V. A., et al. Skorost' rasprostraneniya ul'trazvuka v stalefibrobetonakh s tsementno-peschanoy matritsey [The 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.

7. Dorf V., et al. 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, American Concrete Institute, ACI Special Publication 2018, June (SP-326-62), pp. 621–628.