УДК 691.328.4

В.Г. СОЛОВЬЕВ[1], канд. техн. наук (s_vadim_g@mail.ru),
А.Ф. БУРЬЯНОВ[1], д-р техн. наук (rga-service@mail.ru); Х.-Б. ФИШЕР[2], доктор-инженер

[1] Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., д. 26)
[2] Веймарский строительный университет (Германия, 99423, Веймар, Гешвистер-Шолл-Штрассе, 8)

Особенности формирования структуры сталефибробетона при тепловой обработке

Приведены результаты теоретических и практических исследований структурообразования сталефибробетона при тепловой обработке. Установлено, что при определенном сочетании состава бетонной матрицы и режима тепловой обработки возможно получение объемно-преднапряженных сталефибробетонов. Установлены значения остаточных деформаций различных составов сталефибробетонов после тепловой обработки. Определены основные условия, обеспечивающие формирования преднапряжения в стальной фибре после тепловой обработки. Получены уравнения, отображающие зависимости прочностных характеристик сталефибробетонов после тепловой обработки и при твердении в нормальных условиях. Установлено, что формирование преднапряженного фиброкаркаса позволяет увеличить прочностные характеристики сталефибробетонов до 25% по сравнению с теми же составами, твердевшими в нормальных условиях.

Ключевые слова: сталефибробетон, тепловая обработка, объемное преднапряжение, прочностные характеристики.

V.G. SOLOVEV[1], Candidate of Sciences (Engineering) (s_vadim_g@mail.ru),
A.F. BURYANOV[1], Doctor of Sciences (Engineering) (rga-service@mail.ru); H.-B. FISCHER[2], Dr. Engineer
[1] Moscow State University of Civil Engineering(26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)
[2] Bauhaus-Universität Weimar (8, Geschwister-Scholl-Straβe, Weimar, 99423, Germany)

Features of Structure Formation During Heat Treatment of Steel Fiber Reinforced Concrete

In this article are listed the results of the theoretical and practical research in structure formation of steel fiber reinforced concrete during heat treatment. It was found that in a certain combination of the composition of the concrete matrix and the mode of heat treatment may receive volume-prestressed steel fiber reinforced concretes. Determined the residual deformations of various compositions of steel fiber reinforced concretes after heat treatment. Determined the main conditions ensuring prestressed state formation in steel fiber after heat treatment. The equations obtained which are showing the dependence of strength characteristics after heat treatment and the hardening in normal conditions. Founded that the formation of prestressed fiber carcass can increase strength characteristics of steel fiber reinforced concrete up to 25% in compare with the same compositions was curing in normal conditions.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, heat treatment, volume prestressing, strength characteristics.

В настоящее время область применения и объемы производства фибробетонов постоянно увеличиваются. Накоплен значительный опыт применения фибробетонов в различных конструкциях, выполнен большой объем научно-исследовательских работ. Основными направлениями в области совершенствования фибробетонов являются: применение в качестве матрицы модифицированных бетонов с особыми свойствами; исследование бетонов с гибридным дисперсным армированием; исследования эффективности новых видов фибры, изготовленных из различных материалов.

Несмотря на продолжительные исследования, еще существует достаточно возможностей для улучшения свойств традиционных сталефибробетонов. Одной из таких возможностей, по нашему мнению, является целенаправленное создание условий для формирования объемно-преднапряженного фиброкаркаса в бетонной матрице. Ряд проведенных исследований позволяет выделить два основных способа, использование которых позволяет зафиксировать фибру в преднапряженном состоянии, – тепловое воздействие на фибробетонную смесь [1, 2] и применение расширяющихся добавок [3–6]. Однако применение данных способов, даже совместно, не гарантирует формирования преднапряженного фиброкаркаса и улучшения характеристик сталефибробетона из-за ряда особенностей.

Рассмотрим более подробно процесс формирования структуры сталефибробетона при тепловой обработке. На начальном этапе тепловой обработки происходит расширение стальных волокон и матрицы бетона, вызванное повышением температуры всего материала до 80–90°С. Во время данного периода, а также в процессе изотермической выдержки формируется структура бетонной матрицы, а стальные волокна находятся в растянутом состоянии. После завершения изотермической

Currently, the scope of application and the volume of production of fiber-reinforced concrete (FRC) are constantly increasing. Significant experience accumulated in the application of fiber-reinforced concrete in various designs, a large volume of scientific research are made. The main trends in the field of improving fiber concrete are: using as the matrix modified concretes with special properties, studying concretes with hybrid disperse reinforcement, and research of efficiency of new types of fibers made from different materials.

Although long-term studies, there are still enough opportunities to improve the properties of traditional steel FRC. One possibility, in our opinion, is a deliberate creation the conditions for the formation of volume-prestressed concrete matrix. Several studies, allows to allocate two basic ways, the use of which allows to keep the fiber in prestressed condition – the thermal effect on the fiber-reinforced concrete mixture [1, 2] and using expanding additives [3–6]. However, the use of these methods, even together, cannot guarantee the formation of prestressed fiber carcass and increase performance of steel FRC due to several features.

Consider in more detail the process of structure formation of steel FRC during heat treatment. At the initial stage because of the heat treatment take place an expansion of the steel fibers and the concrete matrix, caused by an increase in temperature of all the material up to 80–90°C. During this period and during the isothermal holding structure of concrete matrix is forming and steel fibers are in a stretched state. After completion of the isothermal holding temperature of steel FRC reduced and its residual strains are positive. As a result the matrix of the concrete compressive forces are transferred and fibers stored in the prestressed (stretched) state.

Stresses, resulting from linear strains in the steel fibers ($\sigma_{st,t}$), can be determined by knowing the value of deformation of the individual steel fibre after heat treatment, and calculate by the formula:

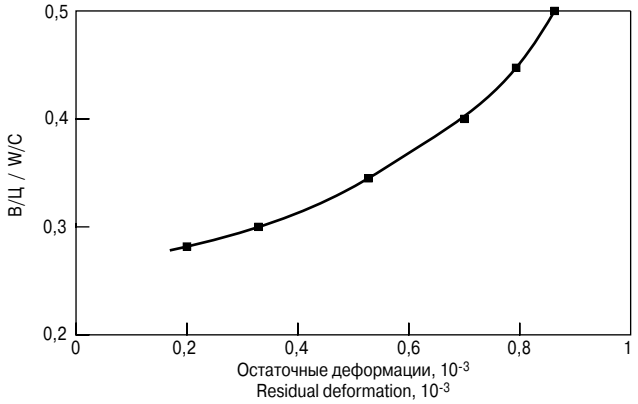

Рис. 1. Влияние водоцементного отношения на остаточные деформации сталефибробетона после тепловой обработки: мелкозернистый бетон с цементно-песчаным отношением 1:1,5; процент дисперсного армирования 0,5% (стальная фибра длиной 60 мм, диаметром 0,6 мм)

Fig. 1. The effect of water-cement ratio on the residual deformation after heat treatment of steel FRC: fine-grained concrete with cement-sand ratio 1:1.5, the percentage 0,5% of the disperse reinforcement (steel fiber length is 60 mm and a diameter 0,6 mm)

Рис. 2. Остаточные деформации сталефибробетона после тепловой обработки: *1* – состава с цементно-песчаным отношением 1:1; *2* – состава с цементно-песчаным отношением 1:1,5; *3* – состава с цементно-песчаным отношением 1:3

Fig. 2. Residual deformation after heat treatment of steel FRC: *1* – with the cement-sand ratio 1:1; *2* – with the cement-sand ratio 1:1.5; *3* – with the cement-sand ratio 1:3

выдержки температура сталефибробетона снижается, и при этом его остаточные деформации положительны. В результате на матрицу бетона передаются сжимающие усилия, а фибра находится в преднапряженном (растянутом) состоянии.

Напряжения, возникающие в результате линейных деформаций в стальных волокнах ($\sigma_{st,t}$), можно определить, зная значение деформации отдельного стального волокна после тепловой обработки, и рассчитать по формуле:

$$\sigma_{st,t} = \Delta l \cdot E_{st} / l_a, \quad (1)$$

где l_a – начальная длина фибры, м; Δl – удлинение фибры, м; E_{st} – модуль упругости стали, ГПа.

Температурное удлинение фибры, происходящее до момента окончания изотермической выдержки, можно определить по следующей формуле:

$$\Delta l_t = \Delta t \cdot l_a \cdot \alpha_t, \quad (2)$$

где α_t – коэффициент линейного расширения стали, $^oC^{-1}$.

С момента снижения температуры сталефибробетона стальные волокна будут стремиться вернуться к своим первоначальным размерам. Однако образовавшаяся бетонная структура будет препятствовать уменьшению стальной фибры до первоначальных размеров на величину остаточных деформаций (ε_{st}). Таким образом, линейные деформации стальной фибры после тепловой обработки будут равны остаточным деформациям сталефибробетона, а значение растягивающих напряжений будет определяться уравнением:

$$\sigma_{st,t} = k_{эф} \cdot \varepsilon_{st} \cdot E_{st}, \quad (3)$$

где $k_{эф}$ – коэффициент эффективности работы фибры.

Остаточные деформации сталефибробетона (ε_{st}) после тепловой обработки, так же как и для тяжелых бетонов, зависят в основном от состава бетонной матрицы и режима тепловой обработки [7]. На рис. 1 и 2 приведены зависимости остаточных деформаций сталефибробетонов после тепловой обработки в зависимости от состава мелкозернистой матрицы.

Для проведения испытаний, результаты которых приведены на рис. 1, использовался мелкозернистый бетон с цементно-песчаным отношением 1:1,5, процент дисперсного армирования 0,5% (стальная фибра длиной 60 мм, диаметром 0,6 мм).

Согласно формуле (3) обязательным условием формирования преднапряжения в стальных фибрах являются положительные остаточные деформации после

$$\sigma_{st,t} = \Delta l \cdot E_{st} / l_a, \quad (1)$$

where: l_a – initial length of the fiber, m; Δl – fiber elongation, m; E_{st} – modulus of elasticity of steel, GPa.

Thermal fiber elongation occurring before the end of the isothermal hold, can be determined by the following formula:

$$\Delta l_t = \Delta t \cdot l_a \cdot \alpha_t, \quad (2)$$

where: α_t – coefficient of linear expansion of steel, $^oC^{-1}$.

Since lowering the temperature of steel FRC, steel fibers will tend to return to their original size. However, the resulting concrete structure will prevent the reduction of steel fiber to its original size by the amount of residual strain (ε_{st}). Thus, the linear deformation of steel fiber after the heat treatment are equal to residual strain of steel FRC, and the value of tensile stress will be determined by the equation:

$$\sigma_{st,t} = k_{eff} \cdot \varepsilon_{st} \cdot E_{st}, \quad (3)$$

where k_{eff} – coefficient of efficiency of the fiber.

Residual strain of steel FRC (ε_{st}) after heat treatment, as well as heavy concrete, depend mainly on the composition of the concrete matrix and heat treatment schedule [7]. Fig. 1 and 2 shows the residual strain of steel FRC after heat treatment depending on the composition of a fine-grained matrix.

For the tests, the results of which are shown in Fig. 1, was used fine-grained concrete with cement-sand ratio 1:1.5, the percentage 0,5% of the disperse reinforcement (steel fiber length is 60 mm and a diameter 0,6 mm).

According to the formula (3), a prerequisite for the formation of the prestressing steel fibers are positive residual deformation after heat treatment. However, the present conditions are not enough, there must still ensure a number of conditions to the effectiveness of the empirical coefficient of fiber (k_{eff}) was greater than zero. In this study were defined conditions for steel FRC based on fine concrete matrix, providing positive k_{eff}: use of steel fiber with anchoring at the ends, sand-cement ratio from 1:1.5 to 1:3, the strength of the concrete matrix at least 20 MPa , the pre-exposure is not more than 3 hours. The actual values of k_{eff} calculated by the formula 3 and amounted 0.04–0.18. At the same time, tension in the steel fiber ($\sigma_{st,t}$) determined on cylindrical samples of fine concrete, in the center of which established the individual fiber extending beyond the end of the cylinder. The diameter of the sample is selected depending on the desired ratio of reinforcement. Fixation of the linear dimensions provided evidence of the actual strain of steel fiber.

It should be noted that the production of volume-prestressed steel FRC possible when a certain combination of

тепловой обработки. Однако выполнения данного условия недостаточно, необходимо обеспечение еще ряда условий, для того чтобы эмпирический коэффициент эффективности работы фибры ($k_{эф}$) был больше нуля. В рамках данного исследования были определены условия для сталефибробетона на основе мелкозернистой бетонной матрицы, обеспечивающие положительное значение $k_{эф}$: применение стальной фибры с анкеровкой на концах; цементно-песчаное отношение от 1:1,5 до 1:3; прочность бетонной матрицы не менее 20 МПа; время предварительной выдержки не более 3 ч. Фактические значения коэффициента $k_{эф}$ рассчитывались по формуле (3) и составили 0,04–0,18. При этом напряжения в стальной фибре ($\sigma_{st,t}$) определялись на образцах цилиндрической формы из мелкозернистого бетона, в центре которых устанавливаются отдельные фибры, выступающие за торцевую часть цилиндра. Диаметр образцов подбирается в зависимости от требуемого коэффициента армирования. Фиксирование линейных размеров позволило получить данные о фактическом напряжении стальной фибры.

Следует особо отметить, что получение объемно-преднапряженных сталефибробетонов возможно при определенном сочетании состава бетонной матрицы, применяемых добавок и режима тепловой обработки. Применение только тепловой обработки сталефибробетона, на примере сталефибробетонов с расширяющимися добавками [8], не гарантирует явного эффекта. В каждом отдельном случае необходим последовательный подбор технологических факторов, в совокупности обеспечивающих формирование объемно-преднапряженного фиброкаркаса.

Для определения зависимостей прочностных свойств сталефибробетона, подвергаемого тепловой обработке, от состава было проведено исследование на основе трехфакторного эксперимента.

В качестве факторов варьирования были приняты: цементно-песчаное отношение (Ц:П), водоцементное отношение (В/Ц) и коэффициент армирования сталефибробетона по объему (μ_v). Для характеристики состава сталефибробетона были приняты не фактический расход какого-либо из компонентов, а их соотношения (Ц:П и В/Ц), что позволило двумя параметрами, которые возможно варьировать в пределах ограниченных правилом абсолютных объемов, характеризовать состав цементно-песчаной матрицы. Уровни варьирования факторов приведены в таблице.

При проведении эксперимента был принят режим тепловой обработки (2)+3+6+1 ч при температуре изотермической выдержки 80°С.

В процессе экспериментальных исследований были получены уравнения (4)–(8), отображающие зависимости прочности при сжатии и растяжении при изгибе в возрасте 1 и 28 сут после тепловой обработки, а также при твердении в нормальных условиях:

$$R_{сж,\,1} = 36+7{,}76(X_1)-6{,}54(X_2)+4{,}27(X_3)-4{,}73(X_1)(X_2)-5{,}4(X_1)^2; \quad (4)$$

$$R_{сж,\,28} = 50{,}59+12{,}44(X_1)-8{,}84(X_2)+5{,}12(X_3)-2{,}49(X_1)(X_3)-11{,}9(X_1)^2+6{,}96(X_3)^2; \quad (5)$$

$$R_{сж,\,н.у.} = 46{,}02+17{,}76(X_1)-7{,}74(X_2)+5{,}08(X_3)-3{,}47(X_1)^2+4{,}43(X_3)^2; \quad (6)$$

$$R_{из,\,28} = 12{,}54+2{,}69(X_1)-2{,}11(X_2)+6{,}39(X_3)-0{,}99(X_1)(X_3)-0{,}96(X_2)(X_3)-2{,}34(X_1)^2; \quad (7)$$

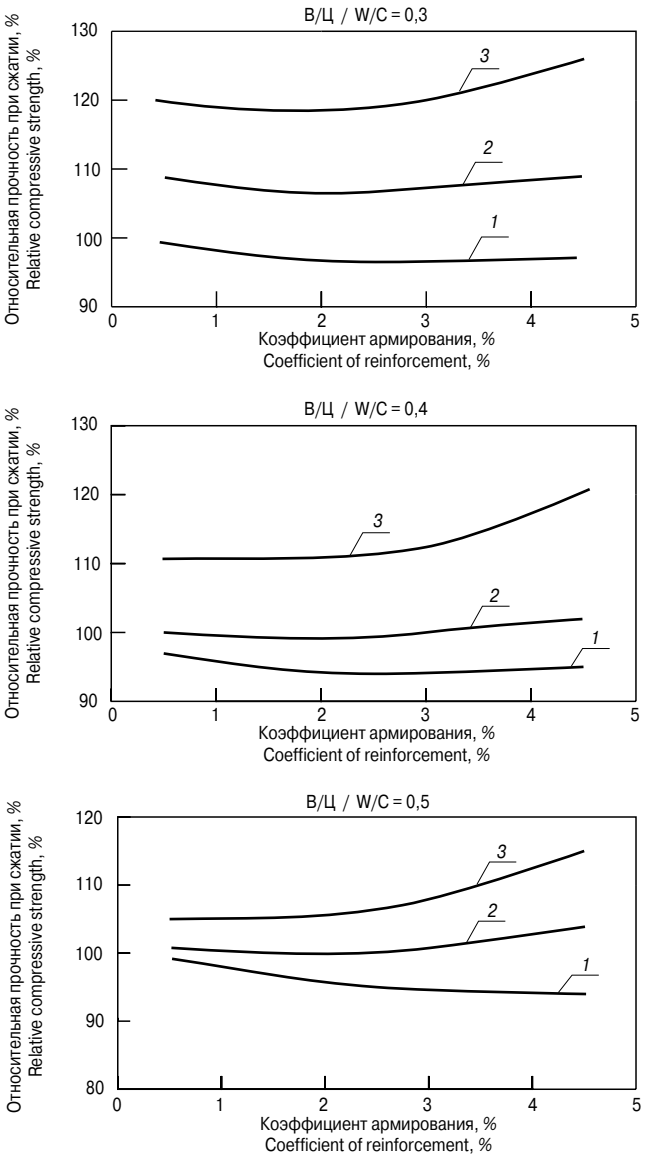

Рис. 3. Зависимость отношения прочности при сжатии сталефибробетонов после тепловой обработки к прочности при сжатии сталефибробетонов, твердевших в нормальных условиях, от коэффициента армирования: *1* – состава с цементно-песчаным отношением 1:1; *2* – состава с цементно-песчаным отношением 1:1,5; *3* – состава с цементно-песчаным отношением 1:3

Fig. 3. Dependence of the ratio compressive strength after heat treatment of steel FRC to steel FRC compressive strength, but under normal conditions cured from coefficient of reinforcement: *1* – with the cement-sand ratio 1:1; *2* – with the cement-sand ratio 1:1.5; *3* – with the cement-sand ratio 1:3

the composition of the concrete matrix, applied additives and heat treatment mode. Use only the heat treatment of steel FRC on the example of steel FRC with expanding additives [8] does not guarantee the apparent effect. In each case requires a consistent selection of technological factors in all providing the formation of a volume-prestressed fibercarcass.

To determine the dependencies of strength properties of steel FRC subjected to heat treatment from the composition, a study was made on the basis of a three-factor experiment.

The factors of variation were taken: a cement-sand ratio (C:S), water-cement ratio (W/C), and reinforcement ratio by volume of steel in FRC (μ_v). To characterize the composition of steel FRC were adopted not the actual consumption, but the components ratio (C:S and W/C), that allowed with two parameters which may vary limited within the rule of absolute volumes, characterize the composition of cement-sand matrix. Levels of factors variation are shown in Table.

Факторы Factors	Обозначение Symbol	Уровни варьирования Levels of variation		
		-1	0	+1
Цементно-песчаное отношение Ц/П Cement-sand ratio (C:S)	X_1	0,33	0,67	1
Водоцементное отношение В/Ц Water-cement ratio (W/C)	X_2	0,3	0,4	0,5
Объемное содержание фибры в бетоне μ_v, % Volume of steel FRC (μ_v)	X_3	0,5	2,5	4,5

$$R_{из,\ н.у} = 12{,}53+3{,}59(X_1)-1{,}99(X_2)+6{,}18(X_3)+1{,}96(X_1)(X_3)-$$
$$-0{,}81(X_2)(X_3)-2{,}03(X_1)^2+1{,}67(X_2)^2-0{,}98(X_3)^2. \quad (8)$$

Сравнительный анализ по показателю прочности при сжатии сталефибробетонов в возрасте 28 сут, подвергнутых тепловой обработке, с теми же составами, твердевшими все время в нормальных условиях, приведен на рис. 3.

В результате проведенных исследований установлено, что при оптимально подобранном составе и режиме тепловой обработки возможно получение объемно-преднапряженных сталефибробетонов с увеличенными прочностными характеристиками до 25% по сравнению с теми же составами, твердевшими в нормальных условиях.

Наиболее перспективной областью применения объемно-преднапряженных сталефибробетонов являются сборные конструкции и массивные монолитные сооружения, так как именно при их производстве возможно оптимальное сочетание всех технологических факторов, обеспечивающих получение данных композиционных материалов.

Список литературы

1. Sukontasukkul P., Pomchiengpin W., Songpiriyakij S. Post-crack Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature // *Construction and Building Materials.* 2010. No. 24, pp. 1967–1974.
2. Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф., Елсуфьева М.С. Особенности производства сталефибробетонных изделий и конструкций // *Строительные материалы.* 2014. № 3. С. 18–21.
3. Yan Z., Pantelides C.P. Concrete column shape modification with FRP shells and expansive cement concrete // *Construction and Building Materials.* 2011. Vol. 25. Issue 1, pp. 396–405.
4. Cao S.P., Zhou Q.F., Peng Y.L., Li G.X. Effects of expansive agent and steel fiber on the properties of the fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete // *Applied Mechanics and Materials.* 2013 Vol. 357–360, pp. 1332–1336.
5. Wang A., Deng M., Sun D., Mo L., Wang J., Tang M. Effect of combination of steel fibers and MgO-type expansive agent on properties of concrete // *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition.* 2011. Vol. 26, pp. 786–790.
6. Елсуфьева М.С., Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф. Применение расширяющихся добавок в сталефибробетоне // *Строительные материалы.* 2014. № 8. С. 60–63.
7. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 528 с.
8. Corinaldesi V., Nardinocchi A., Donnini J. The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites // *Construction and Building Materials.* 2015. Vol. 91, pp. 171–179.

While the experiment was passing heat mode accepted (2)+3+6+1 hour(s) at the temperature of the isothermal hold 80°C.

During the experimental studies were obtained equation (4)–(8) showing relationships between compressive strength and the flexural tensile aged 1 days and 28 days after heat treatment and hardening in normal conditions:

$$R_{c,\ 1} = 36+7{,}76(X_1)-6{,}54(X_2)+4{,}27(X_3)-$$
$$-4{,}73(X_1)(X_2)-5{,}4(X_1)^2; \quad (4)$$

$$R_{c,\ 28} = 50{,}59+12{,}44(X_1)-8{,}84(X_2)+5{,}12(X_3)-$$
$$-2{,}49(X_1)\ (X_3)-11{,}9(X_1)^2+6{,}96(X_3)^2; \quad (5)$$

$$R_{c,\ n.c.} = 46{,}02+17{,}76(X_1)-7{,}74(X_2)+$$
$$+5{,}08(X_3)-3{,}47(X_1)^2+4{,}43(X_3)^2; \quad (6)$$

$$R_{fl,\ 28} = 12{,}54+2{,}69(X_1)-2{,}11(X_2)+6{,}39(X_3)-$$
$$-0{,}99(X_1)(X_3)-0{,}96(X_2)(X_3)-2{,}34(X_1)^2; \quad (7)$$

$$R_{fl,\ n.c.} = 12{,}53+3{,}59(X_1)-1{,}99(X_2)+6{,}18(X_3)+1{,}96(X_1)(X_3)-$$
$$-0{,}81(X_2)(X_3)-2{,}03(X_1)^2+1{,}67(X_2)^2-0{,}98(X_3)^2. \quad (8)$$

Comparative analysis in terms of compressive strengthof steel FRC after 28 days subjected to a heat treatment with the same compositions cured all the time under normal conditions is shown n Fig. 3.

As a result of studies, it found that by optimally chosen composition and heat treatment schedule may receive a volume-prestressed steel FRC with increased strength characteristics up to 25% compared with the same compositions cured under normal conditions.

The most promising area of application of volume-prestressed steel FRC are prefabricated and massive monolithic structures cause in their production possible optimal combination of technological factors, providing those composite materials.

References

1. Sukontasukkul P., Pomchiengpin W., Songpiriyakij S. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials.* 2010. No. 24, pp. 1967–1974.
2. Solovyev V.G., Buryanov A.F., Yelsufyeva M.S. Features of the production of steel fibre concrete products and designs. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 18–21. (In Russian).
3. Yan Z., Pantelides C.P. Concrete column shape modification with FRP shells and expansive cement concrete. *Construction and Building Materials.* 2011. Vol. 25. Issue 1, pp. 396–405.
4. Cao S.P., Zhou Q.F., Peng Y.L., Li G.X. Effects of expansive agent and steel fiber on the properties of the fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete. *Applied Mechanics and Materials.* 2013 Vol. 357–360, pp. 1332–1336.
5. Wang A., Deng M., Sun D., Mo L., Wang J., Tang M. Effect of combination of steel fibers and MgO-type expansive agent on properties of concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition.* 2011. Vol. 26, pp. 786–790.
6. Elsuf'eva M.S., Solovyev V.G., Bur'yanov A.F. Applying of expanding additives in the concrete reinforced steel fiber. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 8, pp. 60–63. (In Russian).
7. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Technology of Concrete]. Moscow: ASV. 2011. 528 p.
8. Corinaldesi V., Nardinocchi A., Donnini J. The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials.* 2015. Vol. 91, pp. 171–179.