Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Стурова В.А. Исследование деформативных свойств стале-фиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 18–31. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02

Bondarev B.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Studying deformation properties of steel fiber slag reinforced concrete under axial tension and compression in view of its age. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8, no. 1. Pp. 18-31. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 1, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.02

УДК 691.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОШЛАКОБЕТОНА ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ С УЧЕТОМ ЕГО ВОЗРАСТА

Б.А. Бондарев, Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, В.А. Стурова

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 10 ноября 2016
Принята: 22 декабря 2016
Опубликована: 30 марта 2017

Ключевые слова:

аналитическая зависимость, стале-фиброшлакобетон, осевое растяжение, сжатие, фибра, диаграмма, модуль упругости, композит, прочность, момент трещинообразования

АННОТАЦИЯ

Расширение применения железобетонных конструкций из бетонов, позволяющих использовать для их производства вторичные отходы различных отраслей промышленности и местные заполнители, способствует экономичному потреблению материальных и энергетических ресурсов, снижению стоимости и трудоемкости технологических процессов. К таким бетонам, в частности, относится мелкозернистый шлакобетон на основе отсева от дробления литого шлакового щебня (ЛШЩ). Одним из направлений улучшения качества такого бетона является введение в состав шлакобетонной смеси стальных фибр, обладающих высокими прочностными показателями при растяжении и повышенным модулем упругости, что позволяет отказаться в некоторых конструкциях от стержневой арматуры. Целью настоящего исследования является получение расчетных формул, позволяющих определять деформативные характеристики сталефиброшлакобетона (СФШБ) при осевом растяжении и сжатии с учетом возраста бетона.

Испытаниям на осевое растяжение и сжатие подверглись образцы, изготовленные на основе шлаков металлургического производства ОАО «НЛМК» с различным объемным содержанием фибровой арматуры. Испытания образцов на растяжение производились на специальной экспериментальной установке, испытания образцов на сжатие – в прессе ИП-100 и на универсальной разрывной машине Р-20.

Анализ экспериментальных данных позволил модифицировать данные зависимости для образцов СФШБ, составить уравнение для определения начального модуля упругости для СФШБ в возрасте t , начертить теоретические диаграммы для СФШБ при осевом растяжении и сжатии. В результате кривые, построенные по полученным формулам, показали высокую степень корреляции с экспериментальными данными.

© ПНИПУ

© **Бондарев Борис Александрович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: LNSP-48@mail.ru.

Черноусов Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: nto_tezis@mail.ru.

Черноусов Роман Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: ozzgood@inbox.ru.

Стурова Виктория Андреевна – магистрант, e-mail: v-livenceva@mail.ru.

Boris A. Bondarev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: LNSP-48@mail.ru.

Nikolai N. Chernousov – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: nto_tezis@mail.ru.

Roman N. Chernousov – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ozzgood@inbox.ru.

Viktoriia A. Sturova – Master Student, e-mail: v-livenceva@mail.ru.

STUDYING DEFORMATION PROPERTIES OF STEEL FIBER SLAG REINFORCED CONCRETE UNDER AXIAL TENSION AND COMPRESSION IN VIEW OF ITS AGE

B.A. Bondarev, N.N. Chernousov, R.N. Chernousov, V.A. Sturova

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 November 2016
Accepted: 22 December 2016
Published: 30 March 2017

Keywords:

analytical relations, steel fiber slag reinforced concrete, axial tensile, compression, fiber, diagram, elastic modulus, composite, strength, cracking moment

ABSTRACT

The fact that the use of reinforced concrete structures produced from secondary wastes of different industries and local aggregates is stimulating a cost-effective consumption of material and energy resources, reduces costs and time of technological processes. The fine slag concrete is an example of such concretes; it is based on the screening dust of the cast slag crushed stone. One of the solutions aiming to improve the concrete quality is to introduce steel fibers into the slag-concrete mixture, because such fibers have high strength under tension and elastic modulus, which makes it possible not to use reinforcement rods in some structures. The aim of this study is to obtain computational formulas allowing to determine the deformation characteristics of the steel fiber slag reinforced concrete (SFSRC) under axial tension and compression taking into account the concrete age.

Axial tension and compression tests were carried out using the samples produced from metallurgical slags of OAO "NLMK" with different volumetric contents of the fiber reinforcement. The tension tests were carried out using special experimental equipment. Compression tests were carried out in the IP-100 press and P-20 universal tensile testing machine.

The experimental data analysis allowed modifying the dependences for the SFSRC samples, making an equation for determining the initial elasticity modulus for the t-aged SFSRC, drawing theoretical diagrams for the SFSRC samples under axial tension and compression. As a result, the curves built on the basis of the gained formulas showed a good compliance with the experimental data.

© PNRPU

Введение в бетон дисперсной арматуры позволяет получить композит с прочностью на растяжение в несколько раз больше, чем для бетона-матрицы. Повышение прочностных свойств у СФШБ позволяет отказаться в некоторых конструкциях от стержневой арматуры.

В то же время рост уровня автоматизации расчетов элементов строительных конструкций предъявляет более высокие требования к информативности результатов исследований их действительной работы, что особенно важно при построении алгоритмов расчета по диаграммной методике. Значительная часть расчетов элементов строительных конструкций основывается на таких характеристиках материала, как призматическая прочность бетона R_b , кубиковая прочность R_m или прочность бетона при осевом растяжении R_{bt} . Для СФШБ-конструкций подобный набор данных низкоинформативен, поскольку наряду с прочностными свойствами значительную роль в расчете играют также деформативные характеристики (начальный модуль упругости шлакобетона (ШБ) E_b^0 и СФШБ E_{fb}^0 , предельные относительные деформации при растяжении ε_{btR} , ε_{fbtR} и сжатии ε_{bR} , ε_{fbr} для ШБ и СФШБ соответственно).

Исследование деформативных свойств мелкозернистого шлакобетона-матрицы (ШБ) приведено в работе [1].

Испытания проводились на образцах, изготовленных на основе шлаков металлургического производства ОАО «НЛМК». Они представляют собой отходы от дробления литого шлакового щебня фракции 0–5 мм с насыпной плотностью от 1085 до 1135 кг/м³. В исследуемых составах использовались:

– в качестве вяжущего цемент марки ПЦ-500 D0 Липецкого цементного завода и пластифицирующая добавка «Реламикс» (10%-й раствор);

– в качестве дисперсного армирования фибры «Драмикс» бельгийской фирмы «Бекарт», рубленные из стальной проволоки, диаметром 0,8 мм, длиной 60 мм ($R_f = 1100$ МПа, $E_f = 1,95 \cdot 10^5$ МПа, $d_f = 0,8$ мм, $l_f = 60$ мм) [2]. Диаграмма деформирования стальной фибры приведена на рис. 1.

Рис. 1. Диаграмма деформирования стальной фибры
Fig. 1. Diagram of steel fiber deformation

Твердение бетона происходило в лабораторных условиях при температуре $+18-20$ °С и влажности 70 ± 5 %. Нагружение при испытании на сжатие происходило со скоростью $0,6 \pm 0,4$ МПа/с, при испытании на растяжение – $0,05 \pm 0,02$ МПа/с.

Испытания образцов на растяжение проводились на специальной экспериментальной установке¹. Испытания образцов на сжатие – в прессе ИП-100 и на универсальной разрывной машине Р-20.

В исследуемых на растяжение и сжатие образцах СФШБ использовался бетон-матрица классов В5, В7,5, В10, В15, В20, В25, В27,5.

В исследованиях образцов из СФШБ на растяжение варьировались объемное содержание фибровой арматуры μ_{fv} (0, 0,125, 0,25, 0,375, 0,5, 0,75, 1,3 %) и возраст бетона t (3, 7, 14, 21, 28, 56, 112, 224, 448 сут). Эскизы опытных образцов приведены на рис. 2. Расстояние между фиброволокнами в сечениях образца составляло 5 и 10 мм. Фотоиллюстрация, схемы нагружения и закрепления образцов в захватах установки представлены на рис. 3, а, б.

Прочность СФШБ на осевое сжатие определялась на образцах в виде кубов размером $60 \times 60 \times 60$ мм. В исследуемых на сжатие образцах также варьировались объемное содержание фибровой арматуры μ_{fv} (0, 0,22, 0,45, 0,9, 2,23 %), возраст бетона t (3, 7, 14, 21, 28, 56, 112, 224, 448 сут), а также коэффициент k_n (0,247, 1,00), учитывающий работу фибр в сечении, перпендикулярном направлению внешнего сжимающего усилия. Эскизы опытных образцов приведены на рис. 4, а, б.

¹ Способ испытания образцов строительных материалов на растяжение: пат. 2544299 Рос. Федерация: МПК G 01 N 3/08 / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов, А.Н. Прокофьев. № 2013134589/28; заявл. 23.07.2013; опубл. 20.03.15. Бюл. № 8. 5 с.

Рис. 2. Эскизы опытных образцов и их сечений для испытания СФСБ на растяжение
Fig. 2. The sketches of prototypes and their cross sections for tensile testing of SFSRC

Рис. 3. Схемы нагружения (а) и фотоиллюстрация (б)
закрепления образца в захватах установки
Fig. 3. Scheme of loading (a) and an example photo (b)
of the sample fixed in the unit

Результаты испытаний образцов из СФСБ при растяжении (класс бетона-матрицы – В20) представлены на рис. 5, а для шлакобетона в возрасте 3 сут, на рис. 5, б – для шлакобетона в возрасте 28 сут.

Деформация сталефибробетона (СФБ) – сложный процесс. Изучение деформативных свойств СФБ при растяжении показало, что для него характерны следующие стадии работы:

- практически линейный участок диаграммы $\sigma - \epsilon$ (напряжение – относительная деформация), соответствующий упругой работе материала;
- криволинейный участок диаграммы $\sigma - \epsilon$, начинающийся с трещинообразования, соответствующий псевдопластической работе материала.

Рис. 4. Эскизы опытных образцов для испытания СФСБ на сжатие:
а – фибра расположена хаотично ($k_n = 0,247$); б – фибра расположена упорядоченно ($k_n = 1$)
Fig. 4. Sketch of prototypes for compression testing of SFSRC:
а – shows a chaotic fiber ($k_n = 0,247$); б – shows an orderly fiber ($k_n = 1$)

Рис. 5. Экспериментальные диаграммы $\sigma - \epsilon$, полученные при испытании образцов из СФСБ на осевое растяжение
Fig. 5. Experimental graphs $\sigma - \epsilon$ showing the axial tension testing of SFSRC samples

Различные исследователи [3–5], несмотря на получение сопоставимых данных, дают различные толкования результатов. Таким образом, в настоящее время вследствие различий в методиках испытаний образцов и использованном оборудовании разные авторы дают различные оценки момента трещинообразования.

Шорн (Schorn) [6] изучал влияние длины фибр на поведение СФБ в пластической стадии работы. Им был сделан вывод о том, что характер деформирования в случае, когда значение длины заделки фибры $l_{an,f}$ превышает половину длины фибры l_f , связан с нагельным эффектом и работа СФБ при этом обусловлена после образования трещин вначале изгибной жесткостью ориентированных под углом к усилию фибр, а затем на некотором участке выдергивания фибры значением трения об острый уступ края трещины (рис. 6) [7]. При этом образование трещин сопровождалось резким падением нагрузки. В случае $l_{an,f} < l_f / 2$ после образования трещин максимальная нагрузка приходится на ориентированные близко к направлению усилия фибры, у которых по обе стороны трещины заделка больше $l_{an,f}$. С ростом деформаций и обрывом этих фибр в работу включаются остальные фибры, и далее механизм работы аналогичен вышеописанному. Ценность подхода заключается в том, что, дифференцированно рассматривая работу отдельных фибр, разнонаправленных, с различной глубиной заделки, а затем суммируя нагрузки отдельных фибр и заданных деформаций, можно получить диаграмму деформирования в псевдопластической стадии работы. Такой подход предлагается использовать при построении эпюры растянутой зоны изгибаемых СФБ-элементов.

Рис. 6. Механизм работы фибры, ориентированной под углом к растягивающему усилию

Fig. 6. The fibers mechanism oriented at an angle to the tensile force

Иллюстрацией сказанного служит график зависимости суммарного усилия бетона и фибры в растянутой зоне от деформаций в фибре (рис. 7).

Учитывая вышесказанное, диаграмму $\sigma - \epsilon$ для СФСБ при растяжении можно представить схематично (рис. 8, а). Здесь диаграмма условно разделена на два участка и описана с помощью семи опорных точек. Светлая область представляет участок, где происходит совместная работа фибры и бетона (сложение диаграмм растяжения ШБ и фибры), темная область описывает комплексную работу фибр по выходу из ШБ-матрицы.

Рис. 7. Распределение усилий в растянутой зоне нормального сечения комбинированного армированного изгибаемого элемента с ростом относительных деформаций в стержневой арматуре (фибре): *a* – диаграмма растяжения СШФБ; *б* – диаграмма растяжения ШБ; *в* – диаграмма растяжения фибры

Fig. 7. The distribution of forces in the tension zone of the normal section of the combined reinforced bended element depending on the growth of relative deformations in the reinforcement rod (fiber), where: *a* – is the stretching diagram of SFSRC; *b* – is the stretching diagram of SC; *c* – is the fiber stretching diagram

Рис. 8. Схематичные представления диаграммы $\sigma - \epsilon$ для СФШБ при растяжении
Fig. 8. Schematic representation of the diagram $\sigma - \epsilon$ for SFSRC under tension

В этом случае усилие в СФШБ-образце на участке, когда относительные деформации образца не превышают предельного значения относительных деформаций ШБ-матрицы ($\epsilon_{fbl} \leq \epsilon_{fblR}$), выполняется условие

$$N_{fbl} = N_{bt} + N_{ft},$$

где N_{fbl} , N_{bt} , N_{ft} – усилия, создаваемые при растяжении в СФШБ, бетоне и фибре соответственно. Выразив усилие через напряжение и площадь поперечного сечения, получим следующие уравнения:

$$N_{bt} = \sigma_{bt} A_b = \epsilon_{fbl} E_{b,red} A_b,$$

$$N_f = \sigma_f A_f = \epsilon_{fbl} E_{f,red} A_f,$$

$$N_{fbl} = \varepsilon_{fbl} (E_{b,red} A_b + E_{f,red} A_f),$$

$$\sigma_{fbl} = \frac{\varepsilon_{fbl} (E_{b,red} A_b + E_{f,red} A_f)}{A_b + A_f}.$$

Здесь σ_{bt} , σ_f , σ_{fbl} – напряжения в ШБ, фибре и СФШБ соответственно; A_b , A_f – площадь поперечного сечения ШБ и фибры; $E_{b,red}$, $E_{f,red}$ – приведенные модули упругости бетона и фибры; ε_{fbl} – относительная деформация СФШБ-образца.

При этом предельные значения относительных деформаций ШБ-матрицы ε_{fblR} будут также зависеть от процента объемного армирования:

$$\varepsilon_{fblR} = 0,24 \cdot \sqrt[3]{R_{bt}(t)} (1 + 8k_{or}^2 \mu_{fv}) \cdot 10^{-3},$$

где $R_{bt}(t)$ – прочность ШБ в возрасте t при растяжении; μ_{fv} – объемное содержание фибровой арматуры.

Далее, когда относительные деформации образца превышают предельное значение относительных деформаций ШБ-матрицы ($\varepsilon_{fbl} > \varepsilon_{fblR}$), диаграмма описывается посредством сложения диаграмм смещения единичной фибры из ШБ-матрицы.

Кривую «нагрузка – смещение» загруженного конца фибры с одиночным отгибом на конце можно также представить в кусочно-линейном виде (рис. 9).

Рис. 9. Кусочно-линейная диаграмма «нагрузка – смещение»
для стальной фибры с одиночным отгибом на конце
Fig. 9. A piecewise-linear diagram “load – displacement” for the steel
fiber with a single limb at the end

В работе [8] получены следующие зависимости для координат опорных точек кусочно-линейной диаграммы «нагрузка – смещение» для стальной фибры, работающей под нагрузкой в ШБ-матрице (см. рис. 9):

♦ для точки H_{01} :

$$W_{H01} = 1 - 0,02R_b(t), \quad P_{H01} = (355 + 11R_b(t))(0,55 + 0,015l_{an});$$

- ♦ для точки H_{02} : $W_{H02} = 3W_{H01}$, $P_{H02} = 0,7P_{H01}$;
- ♦ для точки H_{03} : $W_{H03} = 6W_{H01}$, $P_{H03} = 0,6P_{H01}$;
- ♦ для точки H_{04} : $W_{H04} = 8W_{H01}$, $P_{H04} = 0,4P_{H01}$.

Здесь $l_{f,an}$ – длина заделки фибры, мм; $R_b(t)$ – прочность на сжатие ШБ в возрасте t , МПа; W_{H0i} – абсциссы точек (смещение фибры), мм; P_{H0i} – ординаты точек (нагрузка), Н. Величины $R_b(t)$ и $R_{bt}(t)$ определяются согласно уравнениям, предложенным в работе [9].

С учетом этих данных координаты точек диаграммы $\sigma - \epsilon$ для СФШБ при растяжении будут определяться следующими формулами:

- ♦ для точки O : $\epsilon_{fbt} = 0$, $\sigma_{fbt} = 0$;
- ♦ для точки A : $\epsilon_{fbt} = 0,24 \cdot \sqrt[3]{R_{bt}(t)} (1 + 8\mu_{fv}) \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{fbt} = \frac{\epsilon_{fbt} (E_b A_b + E_f A_f)}{A_b + A_f}$;
- ♦ для точки B : $\epsilon_{fbt} = 0,24 \cdot \sqrt[3]{R_{bt}(t)} (1 + 8\mu_{fv}) \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{fbt} = \frac{\epsilon_{fbt} (E_b A_b + E_f A_f)}{A_b + A_f} \cdot \left(1 - \frac{7 \cdot 10^{-4}}{\mu_{fv}}\right)$;
- ♦ для точки C : $\epsilon_{fbt} = 10\epsilon_{fbtR}$, $\sigma_{fbt} = \frac{\sum_{j=1}^N P_{H01,j} (k_A)^{\frac{3n}{r_{cp}}}}{A_f + A_b}$;
- ♦ для точки D : $\epsilon_{fbt} = 10\epsilon_{fbtR} \cdot \frac{W_{H02}}{W_{H01}}$, $\sigma_{fbt} = \frac{\sum_{j=1}^N P_{H02,j} (k_A)^{\frac{3n}{r_{cp}}}}{A_f + A_b}$;
- ♦ для точки E : $\epsilon_{fbt} = 10\epsilon_{fbtR} \cdot \frac{W_{H03}}{W_{H01}}$, $\sigma_{fbt} = \frac{\sum_{j=1}^N P_{H03,j} (k_A)^{\frac{3n}{r_{cp}}}}{A_f + A_b}$;
- ♦ для точки F : $\epsilon_{fbt} = 10\epsilon_{fbtR} \cdot \frac{W_{H04}}{W_{H01}}$, $\sigma_{fbt} = \frac{\sum_{j=1}^N P_{H04,j} (k_A)^{\frac{3n}{r_{cp}}}}{A_f + A_b}$;
- ♦ для точки G : $\epsilon_{fbt} = 10\epsilon_{fbtR} \cdot \frac{W_{H04}}{W_{H01}}$, $\sigma_{fbt} = 0$.

Здесь N – количество фиброволокон в СФШБ-образце; n – количество фибр, расположенных в радиусе 10 мм и влияющих на работу единичной центральной фибры; r_{cp} – среднее расстояние до фибр, расположенных в радиусе 10 мм; k_A – коэффициент, учитывающий работу центральной фибры в результате влияния на нее соседних фибр и определяемый по формуле

$$k_A = (0,024 \cdot l_{f,an} - 0,285) \cdot \lambda_f^2 + (0,77 - 0,052 \cdot l_{f,an}) \cdot \lambda_f + 1, \quad (2)$$

где $\lambda_f = l_{f,an}^c / l_{f,an}$; $l_{f,an}^c$ – среднее значение анкерки соседних фибр, мм.

Заметим, что для каждой фибры, диаграмму которой мы суммируем, необходимо производить расчет параметров n , r_{cp} и k_A .

Такое представление диаграммы $\sigma - \epsilon$ для СФШБ при растяжении, требующее учета большого количества данных, удобно для использования в расчетах элементов строительных конструкций на ЭВМ. В иных случаях можно использовать упрощенный кусочно-линейный вид диаграммы $\sigma - \epsilon$ для СФШБ, представленный на рис. 8, б. В работе [5] предложены следующие зависимости для определения координат опорных точек для такой диаграммы:

- ♦ для точки O : $\epsilon_{fbt} = 0$, $\sigma_{fbt} = 0$;
- ♦ для точки A : $\epsilon_A = \epsilon_{fbt} = \frac{\sigma_{fbt}}{E_{fbt}^0}$, $\sigma_{fbt} = \sqrt{R_b} (0,25 + 16\mu_{fv})$;
- ♦ для точки B : $\epsilon_{fbt} = \epsilon_A$, $\sigma_{fbt} = \sqrt{R_b} (-10\mu_{fv}^2 + 0,38\mu_{fv}) \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \sqrt[5]{l_f}$.

Начальный модуль упругости E_{fbt}^0 фибробетона здесь предлагается определять из уравнения

$$E_{fbt}^0 = E_b^0 (1 - 100\mu_{fv}) + 100E_f^0 \mu_{fv}, \quad (4)$$

где E_b^0 , E_f^0 – начальные модули упругости бетона и фибры соответственно.

Анализ экспериментальных данных позволил модифицировать данные зависимости применительно для СФШБ-образцов:

- ♦ для точки O : $\epsilon_{fbt} = 0$, $\sigma_{fbt} = 0$;
- ♦ для точки A : $\epsilon_A = \epsilon_{fbt} = \frac{\sigma_{fbt}}{E_{fbt}^0(t)}$, $\sigma_{fbt} = \sqrt{R_b(t)} (0,2 + 30\mu_{fv})$;
- ♦ для точки B : $\epsilon_{fbt} = \epsilon_A$, $\sigma_{fbt} = \sqrt{R_b(t)} (-10\mu_{fv}^2 + 0,4\mu_{fv}) \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \sqrt[5]{l_f}$.

Начальный модуль упругости $E_{fbt}^0(t)$ для СФШБ в возрасте t предлагается определять по уравнению

$$E_{fbt}^0(t) = E_b^0(28) \left(1 + \left[\frac{23}{55+B} \right] \left[\frac{t-28}{t+5} \right] \right)^{0,3} (1 + 6\mu_{fv}),$$

где B – класс бетона по прочности на сжатие, МПа.

На рис. 10 и 11 изображены теоретические диаграммы, построенные по формулам (1)–(13) для СФШБ класса В20 в возрасте 28 сут.

Результаты испытаний образцов из СФШБ при осевом сжатии представлены на рис. 12, а для шлакобетона класса В7,5 в возрасте 3 сут ($k_n = 1$), на рис. 12, б – для шлакобетона класса В15 в возрасте 3 сут ($k_n = 0,247$).

Рис. 10. Диаграммы $\sigma - \epsilon$ для СФШБ класса В20 в возрасте 28 сут при осевом растяжении, построенные по формулам: а – (1) и б – (2)
Fig. 10. Diagrams $\sigma - \epsilon$ for SFSRC of B20 class with the age of 28 days under axial tension built by using the (1) and (2) formulas

Рис. 11. Диаграммы $\sigma - \epsilon$ для СФШБ класса В20 в возрасте 28 сут при осевом растяжении, построенные по формулам (3) и (4)
Fig. 11. Diagrams $\sigma - \epsilon$ for SFSRC of B20 class with the age of 28 days under axial tension built by using the (3) and (4) formulas

Рис. 12. Экспериментальные данные (а) и теоретические кривые (б) $\sigma - \epsilon$, полученные при испытании образцов из СФШБ на осевое сжатие
Fig. 12. The experimental data (a) and the theoretical curves (b) $\sigma - \epsilon$ gained from axial compression testing of SFSRC samples

Одним из известных аналитических выражений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями бетона при осевом сжатии, является формула, предложенная Н.И. Карпенко [10, 11]. Здесь используется коэффициент изменения секущего модуля, определяемый из условия

$$v_{(f)b} = v_{(f)b,R} \pm (v_0 - v_{(f)b,R}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2},$$

где $v_{(f)b,R}$ – значение коэффициента изменения секущего модуля v_b ($1 \geq v_b \geq 0$) в вершине диаграммы, $v_{(f)b,R} = \sigma_{(f)b,R} / (\varepsilon_{(f)b,R} E_{(f)b}^0)$ ($\sigma_{(f)b,R} = R_{(f)b}$, $\varepsilon_{(f)b,R}$ – относительная деформация при максимальном напряжении, $E_{(f)b}^0$ – начальное значение модуля упругости бетона при растяжении); η – уровень напряжений, $\eta = \sigma_{(f)b} / \sigma_{(f)b,R}$, $0 \leq \eta \leq 1$; v_0 – значение коэффициента в начале диаграммы ($v_0 = 1$ при построении восходящей ветви диаграммы и $v_0 = 2,05v_{(f)b,R}$ при построении нисходящей); ω_1, ω_2 – параметры кривизны диаграммы.

Секущий модуль упругости бетона при любом значении напряжения определяется по формуле

$$E'_{(f)b} = \frac{\sigma_{(f)b}}{\varepsilon_{(f)b}} = v_{(f)b} E_{(f)b}^0. \quad (5)$$

В работах [10, 11] параметры кривизны диаграммы предложено определять по формулам

$$\omega_1 = 2 - 2,5v_{(f)b,R}, \quad \omega_2 = 1 - \omega_1 \quad (6)$$

для восходящей ветви и по формулам

$$\omega_1 = 1,95v_{(f)b,R} - 0,138, \quad \omega_2 = 1 - \omega_1 \quad (7)$$

для нисходящей.

Кривые, построенные по формулам (5)–(7), показали высокую степень корреляции с экспериментальными данными (см. рис. 12 а, б).

Библиографический список

1. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В. Исследование механики работы мелкозернистого шлакобетона при осевом растяжении и сжатии // Строительные материалы. – 2014. – № 12. – С. 59–63.
2. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы // Бетон и железобетон. – 2010. – № 4. – С. 7–11.
3. Кравинскис В.К. Исследование прочности и деформативности бетона при статическом нагружении: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Рига, 1974. – 14 с.
4. Эджингтон Дж., Ханнант Д.Дж., Уильямс Р.И.Т. Бетон, армированный стальной проволокой // Материалы, армированные волокном. – М.: Стройиздат, 1982. – С. 135–150.

5. Sujivorakul C. Model of hooked steel fibers reinforced concrete under tension // High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6. – New York, 2012. – P. 19–26.
6. Shah S.P., Rangan B.V. Fiber reinforced concrete properties // ACI Journal. – 1971. – Vol. 68, № 2. – P. 126–134.
7. Моделирование анкеровки гладкой фибровой арматуры в цементно-песчаном растворе / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов, Б.А. Бондарев // Науч. вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2014. – № 35 (54). – С. 126–134.
8. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В. Исследование анкеровки стальной фибры в цементно-песчаном бетоне // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 96–103.
9. Влияние возраста мелкозернистого шлакобетона на его прочностные характеристики / Б.А. Бондарев, Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов // Науч. вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1 (37). – С. 41–50.
10. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 412 с.
11. Карпенко Н.И., Радайкин О.В. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 3. – С. 10–16.

References

1. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V., Issledovanie mekhaniki raboty melkozernistogo shlakobetona pri osovom rastiazhenii i szhatii [The study of mechanics work fine slag concrete under axial tension and compression]. *Stroitel'nye materialy*, 2014, no 12, pp. 59-63.
2. Chernousov. N.N., Chernousov R.N., Izgibaemye stalefibroshlakobetonnye element [Bendings stalefibroslagconcrete elements]. *Beton i zhelezobeton*, 2010, no 4, pp. 7-11.
3. Kravinskis V.K. Issledovanie prochnosti i deformativnosti betona pri staticheskom nagruzhении [The study of strength and deformability of concrete under static loading]. Abstract of Ph.D. thesis. Riga, 1974, 14 p.
4. Edzhington Dzh., Khannant D. Dzh., Uil'iams R.I.T. Beton, armirovannyi stal'noi provolokoi [Concrete reinforced with steel wire]. *Materialy, armirovannyye voloknom*. Moscow: Stroiizdat, 1982, pp. 135-150.
5. Sujivorakul C. Model of hooked steel fibers reinforced concrete under tension. *High performance fiber reinforced cement composites 6*, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, RILEM, 2012, pp. 19-26.
6. Shah S.P., Rangan B.V. Fiber reinforced concrete properties. *ACI Journal*, 1971, vol. 68, no. 2, p. 126-134.
7. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V., Bondarev B.A. Modelirovanie ankerovki gladkoi fibrovoy armatury v tsementno-peschanom rastvore [Modeling anchoring smooth fiber reinforcement in cement-sand mortar]. *Nauchnyi vestnik Volgogradskogo gosu-*

darstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura, 2014, no 35 (54), pp. 126-134.

8. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V., Issledovanie ankerovki stal'noi fibry v tsementno-peschanom betone [The study anchorage steel fibers in concrete, cement-sand]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 2, pp. 96-103.

9. Bondarev B.A. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V. Vliianie vozrasta melkozernistogo shlakobetona na ego prochnostnye kharakteristiki [Influence of age on his fine cinder strength characteristics]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 1 (37), pp. 41-50.

10. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General mechanics model of concrete]. Moscow: Stroiizdat, 1996. 412 p.

11. Karpenko N.I., Radaikin O.V. K sovershenstvovaniuu diagramm deformirovaniia betona dlia opredeleniia momenta treshchinoobrazovaniia i razrushaiushchego momenta v izgi-baemykh zhelezobetonnykh elementakh [To improve the concrete stress-strain diagram for determining the moment of cracking and damaging moment in flexural concrete elements]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiia*, 2012, no 3, pp. 10-16.