

Зависимость полных диаграмм деформирования сталефибробетонов при осевом растяжении от параметров фибрового армирования

Д.Е. Капустин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

Аннотация: В работе рассмотрено влияния вида стальной фибры и ее объемного содержания на изменение характеристик полных диаграмм деформирования сталефибробетонов (СФБ) с высокопрочной цементно-песчаной матрицей. Показано, что введение фибры придает матрице свойства пластичности, которые в большей степени зависят от вида фибры, чем от ее объемного содержания.

Ключевые слова: осевое растяжение, полная диаграмма деформирования сталефибробетона, вид фибры, процент фибрового армирования, пластичность, остаточная прочность.

Применение индустриальных методов строительства с использованием армоопалубочных блоков заводского изготовления с несъемной сталефибробетонной (СФБ) опалубкой позволяет до 50% сократить сроки возведения объектов. При этом полученные железобетонные элементы, имея внешний защитный слой из высокопрочного СФБ, обладают улучшенными характеристиками жесткости, огне- и коррозионной стойкости, а также высоким качеством лицевой поверхности [1, 2].

Выполненные нами [3] и рядом других авторов физический эксперимент [4, 5] и числовое моделирование [6] работы изгибаемого железобетонного элемента с несъемной опалубкой из СФБ показали, что благодаря большему сцеплению с бетоном (выше прочности на осевое растяжение монолитного бетона) опалубка до появления в ней магистральных трещин выполняет функции стержневого армирования [2, 7]. Соответственно для выполнения расчетов и оценки действительного напряженно-деформированного состояния описанных железобетонных элементов необходимо иметь полную диаграмму деформирования СФБ при осевом растяжении, а также иметь основы выбора оптимальных параметров фибрового армирования в

зависимости от поставленных задач.

Имеющиеся в литературе данные о результатах экспериментальных исследований влияния вида стальной фибры на механические характеристики СФБ были получены, в основном, по результатам испытания на сжатие образцов кубов и призм, или балочек на изгиб. При этом, как правило, в экспериментах одновременно проводили сравнение не более, чем двух-трех видов фибры с несколькими видами объемного содержания. Результаты испытаний на осевое растяжение СФБ представлены в малом количестве публикаций [4, 8, 9], что, по-видимому, было связано со значительной сложностью подготовки и проведения испытаний, а также обеспечения однородного напряженного состояния в образце. Также малое внимание уделяют получению по результатам испытаний полных диаграмм деформирования с учетом нисходящей ветви.

Учитывая результаты анализа литературных данных, нами была выполнена оценка влияния вида и содержания фибры на механические характеристики при осевом растяжении СФБ с одной и той же цементно-песчаной матрицей, но с различными видами фибр при различных процентах фибрового армирования. Состав матрицы для изготовления образцов представлен в таблице №1.

Таблица № 1

Состав цементно-песчаной матрицы на 1 м³, кг

цемент	песок	вода	микрокремнезем	гиперпластификатор Sika 5-800
800	1250	260	45	8

Введение в состав матрицы микрокремнезема и пластификатора позволяет снизить водоотделение цементно-песчаной смеси и увеличить ее пластичность, что важно с точки зрения технологии изготовления

конструкций из СФБ, особенно листов опалубки толщиной до 30 мм.

Для исследования было выбрано пять видов фибры из имеющихся в настоящее время на отечественном рынке и часто используемых в проведении экспериментальных работ при исследовании физико-механических свойств СФБ. Внешний вид рассмотренных разновидностей фибры представлен на рисунке 1.

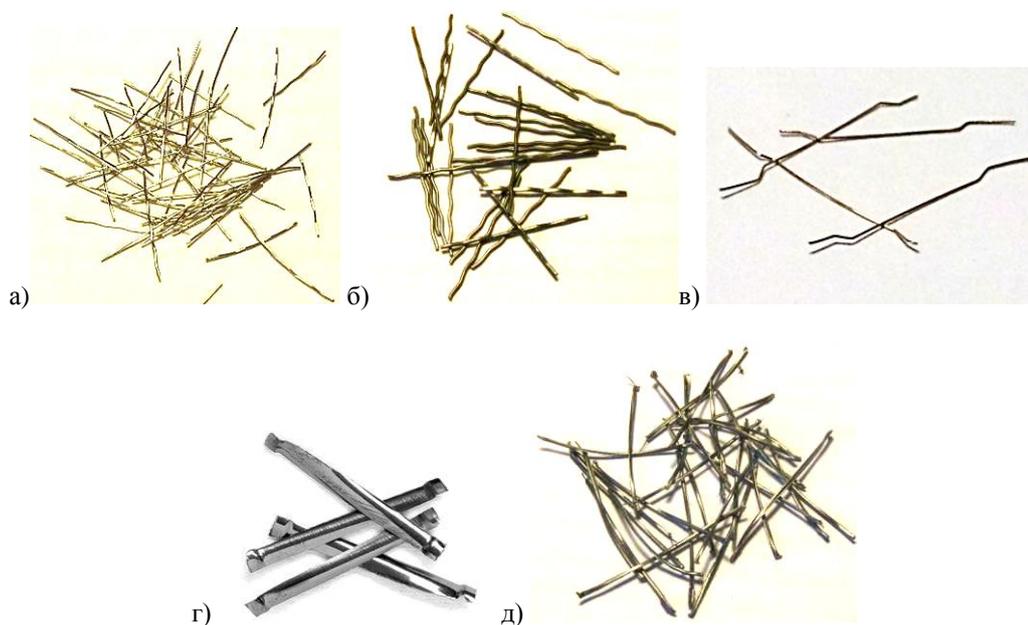


Рис. 1. – Виды стальной фибры

а) ФСПВ 30×0.3 , б) ФСПВ 15×0.3 , в) ФСПА 30×0.3 , г) Narex 32×1.2 , д) ФСЛ 40×0.8

Содержание (по объему) фибры в матрице варьировало от 0,5 до 6 %. Исключение составлял только СФБ с фиброй ФСПА 30×0.3 , так как при ее содержании в матрице более 1,5 % при перемешивании СФБ смеси волокна сцеплялись друг с другом, образуя "ежи". Для учета влияния ориентации фибры и размеров образца на физико-механические параметры СФБ [2] исследования проводили на образцах в форме пластин с галтелями размером $20 \times 30 \times 280$ мм, вырезанных из реального фрагмента опалубки (рисунок 2 а). При этом первоначально из реального фрагмента СФБ опалубки с

использованием алмазных инструментов вырезали пластины. Затем с использованием алмазных коронок диаметром 30 мм выполняли отверстия с расстоянием между центрами 100 мм (рисунок 2 б). Устройство рабочей зоны производили с использованием алмазного диска малого диаметра. Общий вид образца представлен на рис. 2. в.

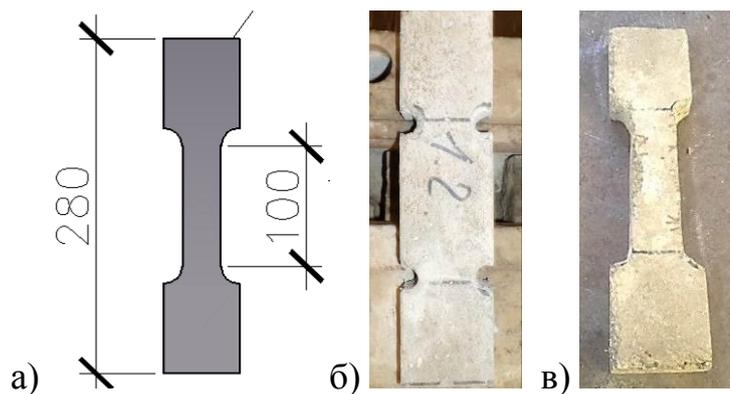


Рис. 2. – Образец для испытания на осевое растяжение:

а) размеры образца б) подготовка образца в) общий вид

Каждая серия образцов состояла не менее, чем из четырех образцов близнецов. Методика проведения испытаний и обработки их результатов соответствовала рекомендациям МИ 11-87 (Методические указания. Прочностные и деформационные характеристики бетонов при одноосном кратковременном статическом сжатию и растяжении. Методика выполнения измерений) и была экспериментально отработана [10].

С целью получения при растяжении полной диаграммы деформирования испытание проводили на жесткой электромеханической машине Instron 3382, обеспечивающей непрерывное перемещение захвата с постоянной скоростью. В процессе испытания непрерывно в автоматическом режиме регистрировали прилагаемые к образцу усилия и продольные деформации образца по тензорезисторам с базой измерения 100 мм, наклеенных на верхнюю и нижнюю (ориентация при бетонировании) грани образцов. Деформации записывали, используя станцию автоматической регистрации показаний National Instruments при помощи алгоритма программного

комплекса LABVIEW.

В процессе испытания использовали комбинированную систему измерения деформаций [11], при которой до образования трещин на поверхности образца контроль вели по тензорезисторам, а после образования трещин по перемещениям захватов испытательной машины. Дополнительно производили контроль деформаций по одной из граней образца с использованием оптического экстензометра Instron AVE 2663-821. Измерения производили с использованием цифровой видеокамеры и двух контрастных меток, нанесенных на образец. Контрольная программа в процессе испытания определяла центры нанесенных меток и в процессе нагружения определяла приращение расстояний. Общий вид процесса проведения испытания представлен на рисунке 3.

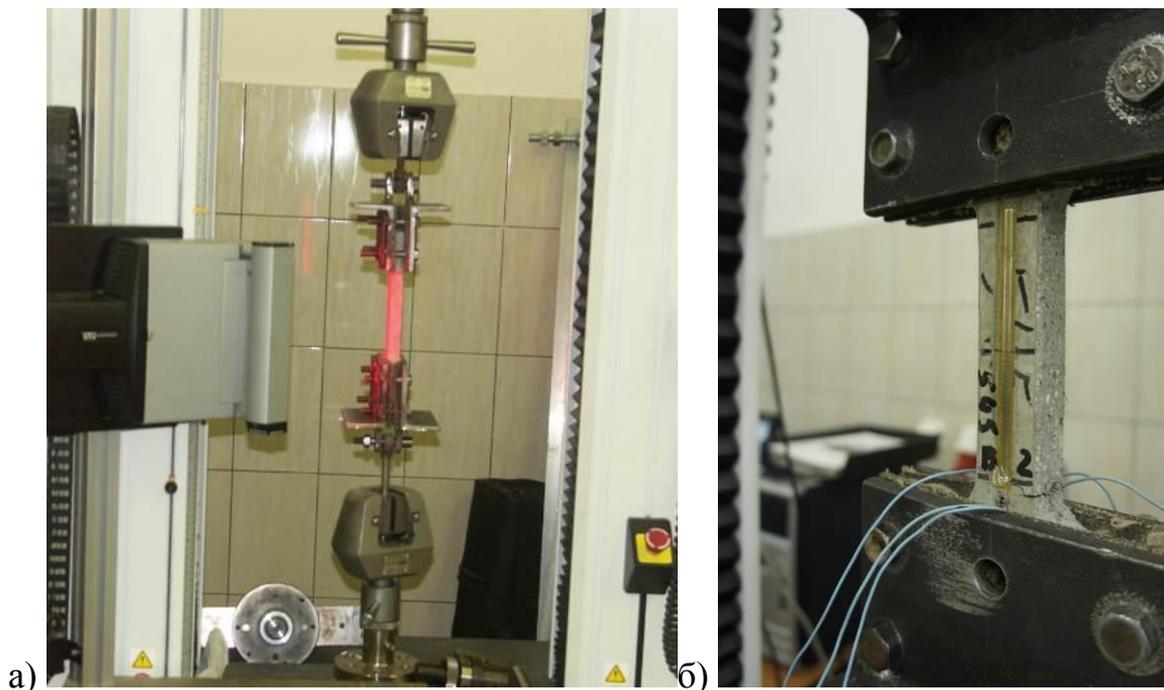


Рис. 3. – Испытание на осевое растяжение: а) общий вид проведения испытания, б) расположение образца в захватах

Обработка полученных данных показала хорошую сходимость результатов контроля деформаций по тензорезисторам и экстензометру до момента образования трещин. Затем тензорезисторы либо переходили в

неработоспособное состояние, либо показывали неадекватные величины деформаций. Дальнейшее построение диаграммы деформирования строили по результатам анализа и сопоставления величин перемещения траверс испытательной машины и данных по экстензометру. В результате анализа полученных диаграмм установлено, что значения деформаций, определенных по перемещению траверсы (особенно на начальном участке нагружения) включало перемещения, связанные как с люфтами механизма траверсы, так и с обмятием и проскальзыванием образца в захватах. При переходе на нисходящую ветвь описанные деформации отсутствуют.

Испытания показали, что увеличение процента армирования до 6 % приводит к росту прочности на осевое растяжение в зависимости от вида фибры и процента армирования, но не более, чем на 80 %. При этом эффективность фибрового армирования зависит, в основном, от прочности сцепления волокон фибры с матрицей. Так, хотя прочность волокон фибры различалась в 3 - 4 раза (таблица №2), прочность на растяжение СФБ с различными видами фибры при одном и том же проценте армирования изменялась в пределах 5 - 8 МПа. Закономерного изменения прочности в зависимости от объема фибры не было установлено. При этом прочность на растяжение СФБ при введении всех рассмотренных видов фибры увеличивалась только до армирования 1%. При больших процентах рост прочности наблюдался только у СФБ с фиброй ФСПА 30×0.3.

По результатам были записаны полные диаграммы продольных деформаций СФБ (рисунок 4) с различными типами фибры (рисунок 2).

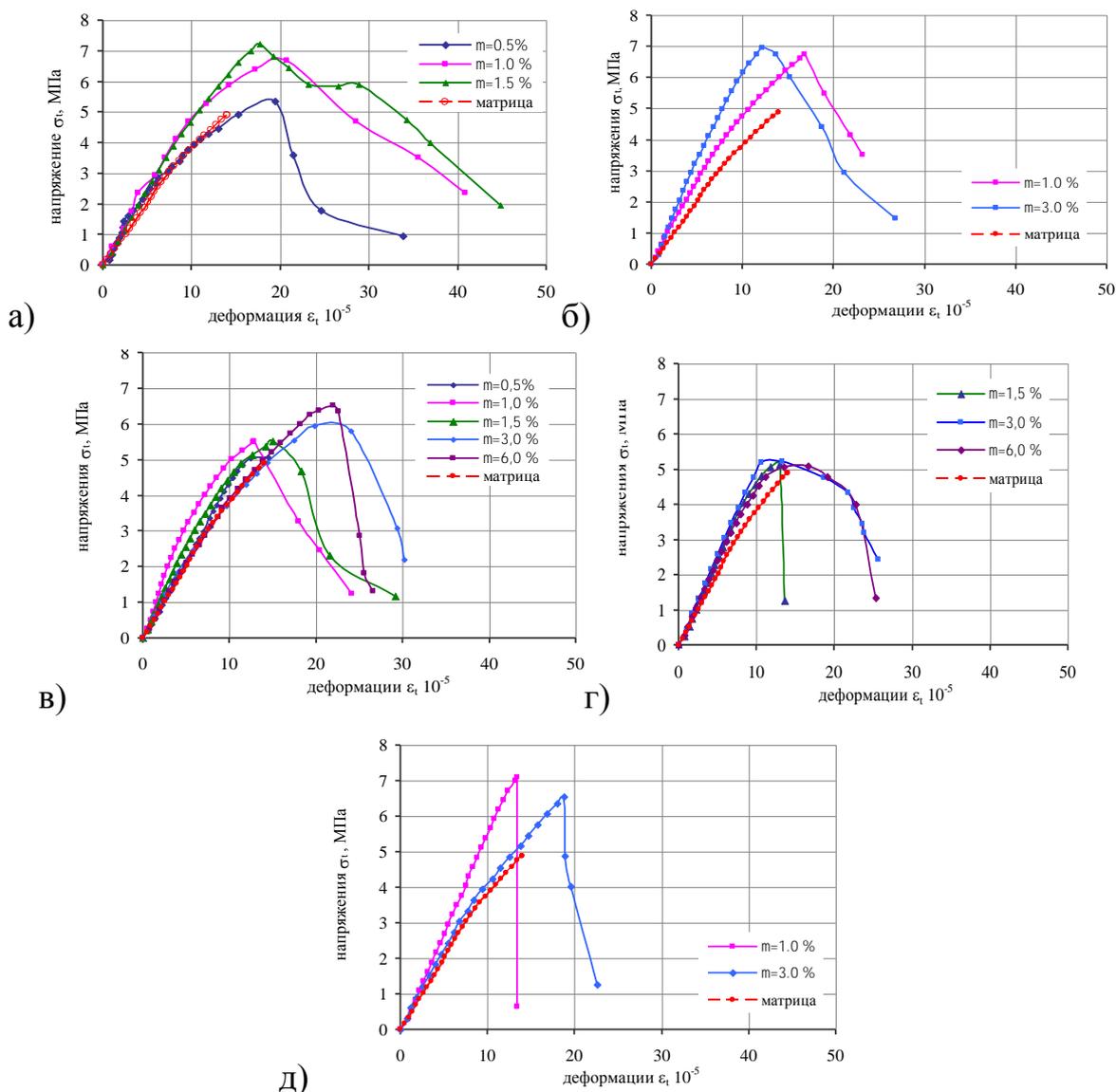


Рис. 4. – Полные диаграммы продольных деформаций $\sigma_t - \epsilon_t$ при

растяжении матрицы и СФБ при разном содержании фибры

а) ФСП-А 30×0.3, б) ФСП-В 15×0.3, в) ФСЛ 40×0.8; г) ФСП 30×0.8, д) Нarex 32×1.2

При обработке и анализе полученных данных основное внимание было уделено определению характеристик нисходящей ветви диаграммы деформирования $\sigma_t - \epsilon_t$ таких, как:

- деформация, соответствующая максимуму напряжений (пределу прочности при растяжении) - ϵ_{tmax} ;

- деформация, соответствующая концу нисходящей ветви диаграммы - ε_{tmax} ;
- деформация, соответствующая приращением деформаций на участке нисходящей ветви - $\Delta\varepsilon_{tmax}$;
- максимальные деформации, измеренные непосредственно перед разрушением образца - ε_{tmax}
- напряжение, соответствующее концу нисходящей ветви диаграммы (остаточная прочность) - σ_{tmax} .

Приведенные на рисунке 4 диаграммы позволяют сделать следующие выводы. Диаграммы СФБ, независимо от вида фибры и ее содержания, имеют нисходящую ветвь, тогда как у матрицы нисходящая ветвь на диаграмме отсутствует. Это говорит о том, что введение фибры в матрицу придает ей в предельном состоянии пластические свойства в результате образования микротрещин в матрице и сдерживания их стальными волокнами [12].

Пластические свойства СФБ определяют деформации нисходящей ветви диаграммы, зависящие от вида фибры. Он определяет характер сцепление волокна фибры с матрицей, т.е. осуществляется ли он по всей его длине фибры (рисунок 4 б, в, г), как в случаях волнистых фибр, изготовленных из проволоки ФСПВ 30×0.3, ФСПВ 15×0.3 (рисунок 1 а и б), и фибры, строганой из листа ФСЛ 40×0.8 (рисунок 1 д), или только за счет анкеров на концах волокна, как у фибр ФСПА 30×0.3 и Harex 32×1.2 (унок 1 б и г).

При анкерных фибрах существенное влияние на значение деформаций нисходящей ветви диаграммы, оказывает тип анкера [13]. Наибольшие деформации имеют место при анкерах такого типа, как у фибры ФСПА 30×0.3 (рисунок 1 в). При деформации образца они выпрямляются и

проскальзывают в бетонном канале, а в бетоне возникают микротрещины, создающие эффект пластичности [12]. В случае анкера в виде жесткого крюка, как у фибры Narex 32×1.2 (рисунок 1 г), вокруг него образуется концентратор напряжений, приводящий к образованию трещин, которые затем соединяются с аналогичными трещинами, от крюков расположенных волокон фибры, что приводит к хрупкости, разрушающей образец.

Анализ влияния процента фибрового армирования на деформации СФБ с разными видами фибр позволяет сделать следующие выводы.

Деформации, соответствующие пределу прочности СФБ на растяжение, (рисунок 5), превышают соответствующие деформации матрицы ($15 \cdot 10^{-5}$), но не более, чем на 75 %, даже при $\mu_{fv} = 6\%$.

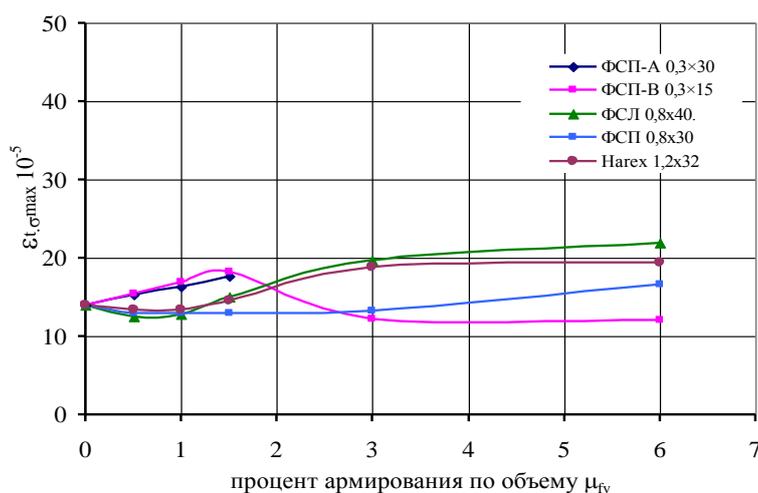


Рис. 5. – Зависимость деформаций, соответствующих пределу прочности на осевое растяжение, от процента армирования сталефибробетонов с различными типами фибры

Деформирования на участке нисходящей ветви при проценте фибрового армирования, большего 1.5 % ($\mu_{fv} > 1.5$), мало зависит от типа фибры и процента армирования (рисунок 6).

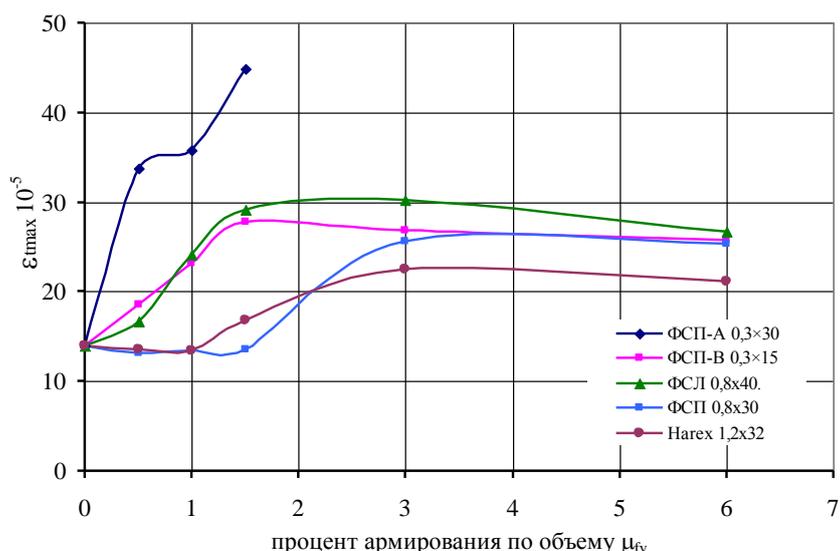


Рис. 6. – Зависимость максимальных деформаций растяжения от процента армирования СФБ с различными типами фибры

Остаточная прочность СФБ незначительна и не превышает, как правило, 2 МПа. Она мало зависит от вида фибры и процента фибрового армирования (рисунок 4).

Анализ результатов данного экспериментального исследования позволяет сделать следующие основные выводы.

Введение стальной фибры в цементно-песчаную матрицу придает ей свойства пластичности, в результате чего полные диаграммы СФБ в отличие от диаграммы матрицы имеют нисходящую ветвь.

Введение стальной фибры увеличивает деформации, соответствующие пределу прочности на растяжение, не более, чем на 75 %.

Деформации нисходящей ветви диаграммы, характеризующие пластические свойства СФБ, зависят от вида фибры. При этом имеет значение – обеспечивает ли данный вид фибры сцепление его волокна с матрицей по всей его длине за счет ее профиля волокна или за счет конструктивных особенностей анкеров на ее концах волокна.

Остаточная прочность СФБ незначительна (не превышает 2 МПа) и мало зависит от вида фибры и процента фибрового армирования.

Литература

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. М.: АСВ. 2011. 642 с.
2. Капустин Д.Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций. Канд. дисс. МГСУ. 2015. 211 с.
3. Kapustin D., Zeid Kiliani L., Krasnovskiy R. Stress-Strain Behavior (SSB) of Steel Fiber Concrete // Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). 2018. SP-326. pp. 63.1-63.10
4. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) // Engineering Structures. 106. (2016). pp. 370–384
5. Ferrara L., Ozyurt N., Prisco M. High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation // Materials and Structures 2011. 44(1). pp. 109–28
6. Ruano G., Isla F., Sfer D., Luccioni B. Numerical modeling of reinforced concrete beams repaired and strengthened with SFRC // Engineering Structures. 2015. pp. 168–181.
7. Капустин Д.Е. Сталефибробетонная опалубка в качестве несущего конструктивного элемента // Научное обозрение. 2015. № 14. С. 77-80.
8. Уткин Д.Г., Григорьев Д.В., Зайцев И.А. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона при статическом и кратковременном динамическом нагружениях // Вестник ТГАСУ 2016. № 6. С. 139-149.
9. Плевков В.С., Белов В.В., Балдин И.В., Невский А.А. Модели нелинейного деформирования углеродофибробетона при статическом и

кратковременном динамическом воздействии // Вестник гражданских инженеров. 2016. №3(56). С. 72-82.

10. Кроль И.С., Красновский Р.О. Измерение полной диаграммы деформирования методом перераспределения усилий // Измерение физико-механических свойств строительных материалов. Сборник научных трудов ВНИ ИФТРИ. М., 1986. С. 77-83.

11. Безгодов И.М., Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // Технологии бетонов. 2014. №8. С. 27-29.

12. Красновский Р.О., Почтовик Г.Я. О механизме деформирования растянутого армированного бетона // Бетон и Железобетон. 1962. № 5. С. 201-206

13. Николаева Е.К., Губарь В.Н. Прочностные свойства бетонов, дисперсно-армированных стальной фиброй // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016.1(117). С. 89-93

References

1. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tehnologii, konstrukcii [Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction]. M.: ASV. 2011.642 p

2. Kapustin D.E. Prochnostnye i deformacionnye harakteristiki nes#emnoj stalefibrobetonnoj opalubki kak nesushhego jelementa zhelezobetonnyh konstrukcij [Strength and deformation characteristics of non-removable steel-fiber concrete formwork as a load-bearing element of reinforced concrete structures]. Kand. diss. MGSU. 2015. 211 p.

3. Kapustin D., Zeid Kiliani L., Krasnovskiy R. Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). 2018. SP-326. pp.63.1-63.10



4. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Engineering Structures. 106. 2016. Pp.370–384.
5. Ferrara L., Ozyurt N., Prisco M. Materials and Structures 2011. 44(1): Pp.109–28.
6. Ruano G., Isla F., Sfer D., Luccioni B. Engineering Structures. 2015. 86. pp.168–181.
7. Kapustin D.E. Nauchnoe obozrenie. 2015. № 14. Pp. 77-80.
8. Utkin D.G., Grigor'ev D.V., Zajcev I.A. Vestnik TGASU 2016. № 6. pp.139-149.
9. Plevkov V.S., Belov V.V., Baldin I.V., Nevskij A.A. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2016. №3 (56). pp. 72-82.
10. Krol' I.S., Krasnovskij R.O. Izmerenie fiziko-mehaniceskikh svojstv stroitel'nyh materialov. Sbornik nauchnyh trudov VNI IFTRI. M. 1986. pp. 77-83.
11. Bezgodov I.M., Levchenko P.Ju. Tehnologii betonov. 2014. №8. pp.27-29.
12. Krasnovskij R.O., Pochtovik G.Ja. Beton i Zhelezobeton. 1962. № 5. pp. 201-206.
13. Nikolaeva E.K., Gubar' V.N. Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury. 2016. № 1(117). pp. 89-93.