

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012.35

*А. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИБРОБЕТОНА СО СТАЛЬНОЙ ФИБРОЙ**

UDC 624.012.35

*A. P. Borysyuk, Y. Y. Ziatyuk*

**RESEARCH ON DEFORMATION CHARACTERISTICS OF FIBER CONCRETE WITH STEEL FIBER**

**Аннотация**

Даны характеристики видов волокон, которые используются для изготовления фибробетона. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований стальной фибры для дисперсного армирования бетонов. Приведены экспериментальные исследования сталефибробетонных образцов.

**Ключевые слова:**

фибробетон, сталефибробетон, стальная фибра, характер деформирования, пластификаторы, добавки, неупругие деформации.

**Abstract**

The characteristics of types of fibers used for manufacturing fiber-reinforced concrete are given in the paper. The results of the research on steel fiber used in disperse-reinforced concrete are considered. The experimental studies of steel fiber concrete samples are presented.

**Key words:**

fibrous concrete, steel fiber concrete, steel fiber, nature of deformation, plasticizers, additives, inelastic deformation.

**Введение**

Для успешного развития строительного производства принципиальны применение в строительстве эффективных строительных конструкций и материалов, разработка и внедрение новых технологий использования в строительных конструкциях, изделиях и материалах отходов металлургической, горнодобывающей промышленности, сертификация строительных материалов, изделий и конструкций.

Строительная отрасль базируется на использовании современных технологий и материалов, которые должны удовлетворять нормам стандартизации [1]. Для решения этих вопросов были разработаны и разрабатываются бетоны, которые владеют высокими эксплуатационными характеристиками, а именно дисперсно-армированные бетоны [2].

*Примечание* – Исследования проводились с использованием стальной фибры, производимой на ООО «БудМат», типа «челябинка» ТУ 0991-123-53832025-2001 (по данным поставщика).

**Существующее состояние вопроса**

Фибробетон – мелкозернистая разновидность бетона с добавлением фибры. Применяется фибра синтетическая, стеклянная и стальная из волокон длиной от 5 до 150 мм и диаметром от 0,2 до 1,0 мм [3].

Исследования с использованием фибробетона проводили А. Б. Голишев, Б. А. Боярчук, Е. М. Бабич, Л. Й. Дворкин, А. Касасбех, А. С. Кричевский, Г. В. Гетун, А. Я. Барашиков, О. П. Сунак, О. И. Валовой, Ф. Н. Рабинович, К. В. Талантова, С. В. Ключев, С. Д. Се-

менюк, В. В. Билозир, Г. К. Хайдуков и др.

Фибробетон состоит из двух материалов и имеет свойства, которых нет у исходных материалов, т. е. это цементно-бетонная матрица. В фибробетоне растягивающие напряжения принимают на себя волокна фибры (табл. 1). Фиброволокно усиливает углы и торцы бетонных конструкций, в начале отвердевания бетона снижает усадку и образование трещин, при снятии опалубки нивелирует вероятность повреждения [4].

Табл. 1. Характеристики видов волокон, которые используют для изготовления фибробетона

Волокно	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Удлинение при растяжении, %
Полипропилен	0,9	3500...8000	400...700	10...25
Полиамид	0,9	1900...2000	720...750	24...25
Полиэтиленовое	0,95	1400...4200	600...720	10...12
Акриловое	1,1	2100...2150	210...420	25...45
Нейлоновое	1,1	4200...4500	770...840	16...20
Вискозное сверхпрочное	1,2	5600...5800	660...700	14...16
Полиэфирное	1,4	8400...8600	730...780	11...13
Хлопковое	1,5	4900...5100	420...700	3...10
Карбоновое	1,63	280 000...380 000	1200...4000	2,0...2,2
Углеродное	2,00	200 000...250 000	2000...3500	1,0...1,6
Стеклянное	2,60	7000...8000	1800...3850	1,5...3,5
Асбестовое	2,60	68 000...70 000	910...3100	0,6...0,7
Базальтовое	2,60...2,70	7000...11 000	1600...3200	1,4...3,6
Стальное	7,80	190 000...210 000	600...3150	3...4

Ценность стальных волокон не только в повышении физико-механических свойств и в технологии изготовления конструкций. Армирование происходит непосредственно в бетоноемалках, автомиксерах на строительной площадке. Время изготовления сокращается практически вдвое, снижается материалоемкость, уменьшается вес зданий и сооружений [5].

Сталефибробетон – композицион-

ный материал из бетонной матрицы, армированный короткими стальными волокнами – фибрами диаметром  $d_f = 0,25...1,2$  мм, с отношением длины к диаметру  $l_f / d_f = 50...120$  и объемным содержанием  $d$  в пределах 0,5...3 % [6].

Для производства фибробетона с наилучшими характеристиками необходимо добиться технологической совместимости бетона-матрицы и фибры, максимальной заанкерированности фибры

в бетоне. Категорически не допускается попадания фибры комками, она должна быть очень тщательно перемешана [7]. Допускается использование различных пластификаторов и добавок, но в случае металлической фибры – это необязательная рекомендация. Одним из основных факторов, влияющих на ход исследования, является точность: точность при дозировании, при выполнении технологических перерывов и догрузок [8].

Важный параметр для фибры – отношение ее длины к диаметру –  $l/d_f$ , которое обеспечивает эффективную работу фибры в бетоне и хорошее сцепление. С увеличением этого отношения ухудшаются условия перемешивания стальной фибры в бетономешалке. Желательным является отношение, равное 80:100 [9].

Полипропиленовые волокна характеризуются значительными деформациями даже при небольших нагрузках растяжения, что объясняется низкой адгезией полипропилена в цементной матрице. Также волокно имеет высокую истираемость поверхности и горючесть при воздействии открытого пламени. Основными недостатками металлических волокон являются катодный эффект и нестойкость к агрессивной среде цементных растворов. Базальтовая фибра под действием агрессивной цементной среды реагирует с получением новообразований. Наблюдается частичное разрушение волокна, величина которого зависит от времени (табл. 2). В среднем разрушение происходит на глубину до 4 мкм [9].

Табл. 2. Физико-механические характеристики цемента марок ПЦ-И-500 и Пц-ии/а-ш-500

Название показателя	Согласно ДСТУ Б.В.2.7-6:2010	Средний показатель	
		ПЦ-И-500	Пц-ии/а-ш-500
Тонкость помола, остаток на сите № 008, %	<15,0	6,0...10,0	6,0...9,0
Удельная поверхность за Блейном, м <sup>2</sup> /кг	–	250...360	240...280
Нормальная плотность цементного теста, %	–	26,5	27,5
Сроки твердения: начало, мин конец, ч	> 60 < 10	90...150 4,5...5	90...120 5...6
Прочность в возрасте 2 сут, МПа: изгиб сжатие	– > 15	3,2...4,2 18,0...25,0	3,0...4,2 15,0...25,0
Прочность в возрасте 28 сут, МПа: изгиб сжатие	– > 50	6,0...6,8 50,0...55,0	5,5...6,6 50,0...52,5
Равномерность изменения объема, мм	< 10	5	5
Содержание добавки гипса в пересчете на SO <sub>3</sub> , %	3,5	3,1	3,3

Сравнивая металлическую и другие фибры, нельзя делать однозначного вывода о преимуществах одной фибры над другой. К этому вопросу нужно подходить комплексно, в зависимости от среды, типа нагрузки и т. п. Немаловажное значение имеет цена, а здесь самой дешевой является металлическая

фибра. Возникает необходимость исследования бетонных изделий, армированных стальной фиброй, резаной из оцинкованного листа, которая к тому же лишена нестойкости к агрессивной среде за счет своего покрытия.

### Материалы для проведения исследований

Материалами для проведения исследований выступали: товарный портландцемент Здолбунивского ПАТ «Волынь-цемент»; песок из месторождений Славутского р-на Хмельницкой обл.; гранитный щебень фракции 5...20 мм Выровского карьера Ровен-

ской обл.; фибра, резаная из листа,  $d_f = 0,5$  мм,  $l_f = 30$  мм.

В качестве *мелкого заполнителя* в растворах и бетонах использовали: кварцевый песок мелкий и средней крупности месторождений Славутского р-на Хмельницкой обл.; в бетонных смесях – крупный заполнитель – гранитный щебень фракции 5...20 мм Выровского карьера Ровенской обл. Характеристики заполнителей представлены в табл. 3.

Табл. 3. Характеристика заполнителей

Показатель	Песок П1	Песок П2	Щебень
Модуль крупности	1,87	2,11	–
Фракция, мм	–	–	5...20
Наибольшая крупность зерен, мм	1,25	2,5	20
Полный остаток на сите № 0,63, %	27	37	–
Водопотребность, %	8,8	6,6	3,1
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	2,4	1,7	–
Действительная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2650	2690	2570
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1420	1380	1450
Пустотность, %	46,4	48,7	43,5

Существенных включений в песках органических, серистых и сернокислых примесей, аморфного кремнезема не обнаружено. Зерновой состав песка находился в диапазоне, который отвечает требованиям ДСТУ (государствен-

ных стандартов Украины).

В качестве *основного заполнителя* бетона был использован отсев измельчения гранита на щебень Выровского карьера Ровенской обл. (табл. 4).

Табл. 4. Зерновой состав гранитного отсева Выровского карьера

Частичный остаток на ситах с размером амбарчика, мм							M <sub>кр</sub>
5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16	
7,2	34,7	10,5	14,2	13,6	10,9	17,8	3,02

Физические свойства отсева, отмытого от пылевидных примесей:

– насыпная плотность в сыпучем состоянии  $\rho_n = 1,47$  г/см<sup>3</sup>;

– насыпная плотность в уплотнённом состоянии  $\rho_n' = 1,87$  г/см<sup>3</sup>;

– пустотелость в сыпучем состоя-

нии – 47,7 %;

– пустотелость в состоянии уплотнения вибропрессованием – 30,7 %.

Все исследуемые отсева характеризовались значительным содержанием частиц < 0,16 мм (15,20 %).

*Фибровые волокна.* Листовую

фибру (рис. 1) получают путем резания стального листа, который сначала поддают холодному обкатыванию. Листовая фибра способна оказывать сопротивление растяжению в пределах 510...850 МПа. Согласно технологии

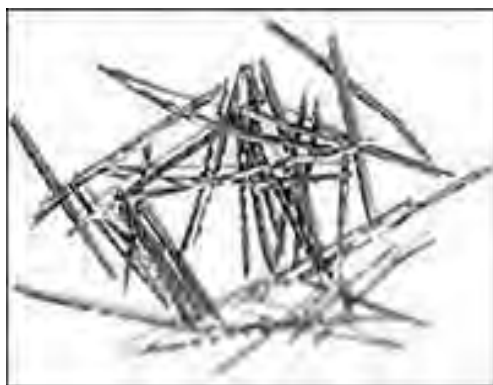


Рис. 1. Фибра, резаная из листа (листовая фибра)

производства можно получить даже жаростойкую фибру из нержавеющей стали, которую используют для армирования конструкций и сооружений с высоким показателем теплостойкости.

Плотность –	7,5 г/см <sup>3</sup> .
Диаметр волокна –	0,35...0,5 мм.
Длина волокна –	40...45 мм.
Форма –	отдельные плоские волокна с волной.
Прочность на разрыв –	510...850 МПа.
Коэффициент растяжения –	8 %.
Модуль Юнга –	> 10000 МПа.

Тонкие волокна фибры очень удобны, они препятствуют откалыванию бетона. Это свойство листовой фибры полезно, когда бетон еще не успел затвер-

деть. Добившись достаточной анкеровки, можно улучшить прочность сталефибробетона на стадиях как до, так и после появления трещин (табл. 5 и 6).

Табл. 5. Состав бетона (без фибры)

Состав	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л
На 1 м <sup>3</sup>	370	625	1100	210
На 60 л	22,2	37,5	66	12,6

Табл. 6. Испытание образцов (без фибры)

Марка образцов	Размер	Разрушающее усилие F, кН	Прочность на сжатие, МПа
К-1	10,3 × 10 × 10	139	13,4
К-2	10,2 × 10,2 × 10	141	13,5
К-3	10 × 10,2 × 10,2	145	14,2

*Устраивание фибры в бетон.* Бетономешалку загружают готовой смесью. В рассматриваемом случае поочередно загружали цемент, песок, щебень, воду и после готовности смеси добавляли фибру (табл. 7 и 8). Загрузка фибры осуществлялась в три приема через промежутки времени около 1 мин

при вращающемся барабане бетономешалки. При больших объемах загрузки фибры можно проводить виброситом, пневмозагрузчиком (воздушной помпой). Интервал перемешивания сталефибробетонной смеси не должен превышать 3 мин. Это вызвано тем, что если операцию выполнять дольше, фибра может

пристать к стенкам миксера и осесть неравномерно по телу бетона. Бетонная

матрица для всех образцов изготавливалась из одного состава бетона [10].

Табл. 7. Состав бетона (с фиброй)

Состав	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л	Фибра (3 %), кг
На 1 м <sup>3</sup>	370	625	1100	210	30
На 60 л	22,2	37,5	66	12,6	1,8

Табл. 8. Испытание образцов (с фиброй)

Марка образцов	Размер	Разрушающее усилие F, кН	Прочность на сжатие, МПа
КСФБ-1	10,1 × 10,2 × 10	169	16,4
КСФБ-2	10,1 × 10 × 10	164	16,2
КСФБ-3	10,2 × 10 × 10	172	16,9

Наблюдая за характером разрушения бетонных образцов с фибровым армированием и без него, видна была закономерность, что образцы с фиброй разрушались плавнее и вязко без потери формы образца. Разрушенные образцы держат форму (рис. 2, а) и для того, чтобы рассмотреть расположение

фибры, приходилось разбивать их вручную (рис. 2, б). Можно сделать вывод, что в бетоне с фиброй происходит перераспределение усилий. Фибровые волокна накапливают напряжения, а затем перераспределяют их на крупный заполнитель (рис. 3 и 4).

а)



б)

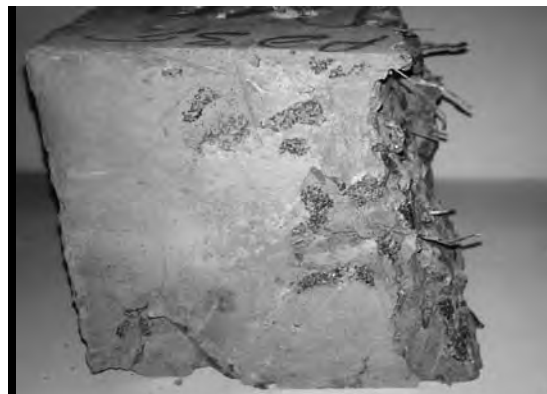


Рис. 2. Вид разрушения кубов с фиброй

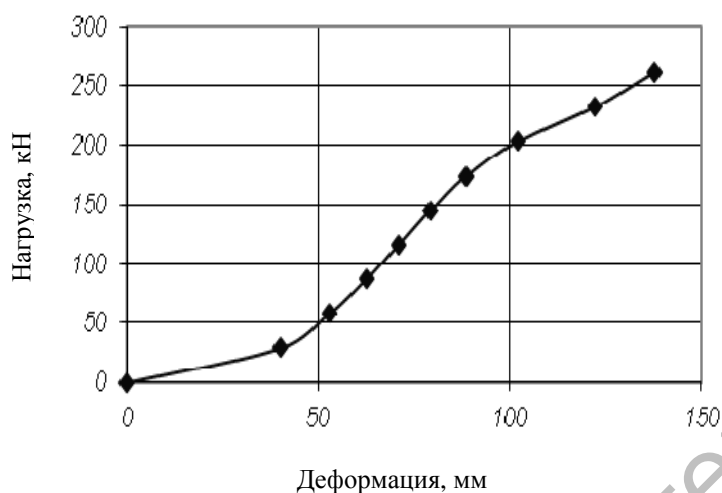


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка – деформация» ПсФБ-2 – образец армированного фиброй бетона

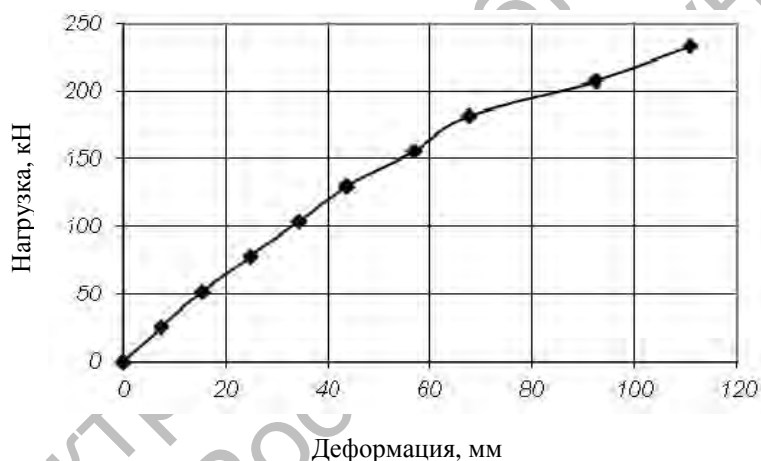


Рис. 4. Диаграмма «нагрузка – деформация» П-2 – образец неармированного бетона

### Выводы

При использовании фибры достигаются более высокие показатели сопротивления бетона, чем без фибры

(рис. 5 и 6). Увеличивается деформативность бетона при максимальных нагрузках.



Рис. 5. Призмы с фибровым армированием после разрушения



Рис. 6. Призма с фибровым армированием после разрушения с характерным расположением фибр в теле бетона

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севка, В. Г. Послідовність розробки стратегії антикризового регулювання будівельної галузі / В. Г. Севка, Н. Б. Паліга // Економіка будівництва і міського господарства. – 2009. – № 1. – С. 41–50.
2. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография / Ф. Н. Рабинович. – М. : АВС, 2004. – 560 с.
3. Фибробетон. Технологии будущего на службе настоящего // Федеральный строительный рынок. – СПб., 2009. – Вып. 74.
4. Дворкін, Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Киев : Основа, 2007. – 312 с.
5. Клюев, С. В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства / С. В. Клюев // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8. – С. 6–10.



6. **Талантова, К. В.** Сталефибробетон с заданными свойствами и строительные конструкции на его основе : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / К. В. Талантова. – Ростов н/Д, 2013. – 36 с.

7. **ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009.** Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталефибробетонних конструкцій. – Київ : М-во регіонального розвитку та будівництва України, 2009. – 42 с.

8. **Борисюк, О. П.** Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених у стиснутій і розтягнутій зоні / О. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Вип. 27. – С. 27–33.

9. **Семенюк, С. Д.** Применение сталефибробетона для усиления сжатой зоны железобетонных балок методом наращивания / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Болошенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2011. – Вип. 21. – С. 402–407.

10. **Новицький, А. Г.** Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов / А. Г. Новицький, М. В. Ефремов // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка : наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 36. – С. 22–26.

11. **Клюев, С. В.** Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций / С. В. Клюев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 4. – С. 71–74.

*Статья сдана в редакцию 19 мая 2016 года*

**Александр Павлович Борисюк**, канд. техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +380-505-69-41-70.

**Юрий Юрьевич Зятюк**, аспирант, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: Zyatjuk.bombberman@yandex.ua.

**Aleksandr Pavlovich Borysyuk**, PhD (Engineering), Prof., National University of Water management and environmental engineering. Phone: +380-505-69-41-70.

**Yury Yuriyevich Ziatyuk**, PhD student, National University of Water management and environmental engineering. E-mail: Zyatjuk.bombberman@yandex.ua.