

УДК 693.55

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИБРОВОГО АРМИРОВАНИЯ

ВЕРЕВИЧЕВА М. А. ¹, *к.т.н, доцент*,
БЕРЕСТЯНСКАЯ А. А. ^{2*}, *аспирант*,
ДЕРИЗЕМЛЯ С. В. ³, *инженер*

¹ Кафедра строительной механики и гидравлики, «Украинский государственный университет железнодорожного транспорта», пл. Фейербаха, 7, 61050, Харьков, Украина, тел.+38 (057) 730-10-70, e-mail: budmekh@ukr.net.

^{2*} Кафедра строительной механики и гидравлики, «Украинский государственный университет железнодорожного транспорта», пл. Фейербаха, 7, 61050, Харьков, Украина, тел.+38 (057) 730-10-70, e-mail: Anastasiia.Berestianska@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-8886-836X

³ Кафедра строительной механики и гидравлики, «Украинский государственный университет железнодорожного транспорта», пл. Фейербаха, 7, 61050, Харьков, Украина, тел.+38 (057) 730-10-70, e-mail: budmekh@ukr.net

Аннотация. *Цель.* Одним из способов усовершенствования строительных материалов является создание композитов, при этом совместная работа разнородных материалов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Наиболее перспективным в этом направлении является дисперсное армирование бетонов различными видами фибр. Распределяясь по всей бетонной матрице, фибра обеспечивает его трехмерное упрочнение. Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа прочностных характеристик различных видов фибрового армирования при различных видах воздействий, на основании которого определяются оптимальные с точки зрения соотношения цена – прочность характеристики армирования (длина и диаметр фибровых волокон, процентное или массовое содержание фиброволокна). Исследования проводятся для базальтовой, полипропиленовой и стальной фибр. *Методика.* На основании экспериментальных исследований различных авторов для каждого из видов фибр проводится анализ влияния размеров и содержания фиброволокна на прочностные характеристики фибробетона. *Результаты.* Базальтовая фибра представляет собой отрезки комплексного базальтового волокна в виде рассыпчатых монофиламентов длиной 3...30 мм, в некоторых случаях до 50 мм, диаметром 13...20 мкм. Наиболее приемлемой с точки зрения прочностных и технологических характеристик является длина 12 мм, процентное содержание 0,2 %. Полипропиленовое фиброволокно изготавливается непрерывным методом из гранул чистого полипропилена путем экструзии и вытяжки при нагревании. Целесообразным является использование фибры ООО «ДПФ» с диаметром 20 мкм, длиной 12 мм и расходом 1,0 кг/м³. Стальная фибра является самым прочным и востребованным материалом. Она может быть получена различными способами: путем резки стальной проволоки или тонкого листа, из токарной стружки, из отходов производства (например, из отработанных канатов) и т. д. Длина фибры зависит от технологии её изготовления. Экспериментальные исследования различных авторов показывают, что наличие петель на концах фибры резко увеличивает индекс сцепления с цементным раствором. В связи с этим, наиболее приемлемой является анкерная фибра «Челябинка», которая имеет более высокие физико-механические характеристики по сравнению с другими видами фибр. Она изготавливается из стального проката (лента, лист) и представляет собой стальную полосу, имеющую на концах анкеры в виде сегментов окружности. Торцы полосы развернуты относительно друг друга на произвольный угол. Таким образом, для базальтовой, полипропиленовой и стальной фибр были определены оптимальные длина, диаметр и процентное или массовое содержание. *Научная новизна.* В результате проведенного анализа были выбраны оптимальные параметры фибрового армирования (длина, диаметр, процентное содержание) для различных видов фибр с целью дальнейших исследований теплофизических и физико-механических характеристик бетонов на их основе. *Практическая значимость.* Возрастание объема применения бетона и изменение условий эксплуатации конструкций требует постоянного усовершенствования бетона. На основании анализа литературных источников систематизированы сведения о наиболее распространенных видах фиброволокна. Это поможет выбрать характеристики фибробетона с оптимальным соотношением цена – прочность, существенно повысив прочностные характеристики бетона. Изучение литературных источников показывает также, что практически отсутствуют данные о прочности фибробетона при температурных воздействиях. Это стимулирует новые экспериментальные и теоретические исследования различных видов фибробетона при пожаре.

Ключевые слова: фибробетон; композит; базальтовая фибра; полипропиленовая фибра; стальная фибра; содержание фибры; размеры фиброволокна

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІБРОВОГО АРМУВАННЯ

ВЕРЕВІЧЕВА М. А. ¹, *к.т.н, доцент*,
БЕРЕСТЯНСЬКА А. О. ^{2*}, *аспірант*,
ДЕРИЗЕМЛЯ С. В. ³, *інженер*

¹ Кафедра будівельної механіки та гідравліки, «Український державний університет залізничного транспорту», м. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-70, e-mail: budmekh@ukr.net.

^{2*} Кафедра будівельної механіки та гідравліки, «Український державний університет залізничного транспорту», м. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-70, e-mail: Anastasiia.Berestianska@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-8886-836X

³ Кафедра будівельної механіки та гідравліки, «Український державний університет залізничного транспорту», м. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-70, e-mail: budmekh@ukr.net

Анотація. Мета. Одним із способів удосконалення будівельних матеріалів є створення композитів, при цьому спільна робота різномірних матеріалів дає ефект, рівнозначний створенню нового матеріалу, властивості якого і кількісно, і якісно відрізняються від властивостей кожного з його складових. Найбільш перспективним у цьому напрямку є дисперсне армування бетонів різними видами фібр. Розподіляючись за всією бетонною матрицею, фібра забезпечує тривимірне зміцнення матеріалу. Метою даної статті є проведення порівняльного аналізу характеристик міцності різних видів фібрового армування при різних впливах, на підставі якого визначаються оптимальні з точки зору співвідношення ціна – міцність характеристики армування (довжина та і діаметр фібрових волокон, процентний чи масовий вміст фіброволокна). Дослідження проводяться для базальтової, поліпропіленової та сталеві фібр. **Методика.** На підставі експериментальних досліджень різних авторів для кожного з видів фібр проводиться аналіз впливу розмірів та вмісту фіброволокна на характеристики міцності фібробетону. **Результати.** Базальтова фібра являє собою відрізки комплексного базальтового волокна у вигляді розсипчастих монофіламентів довжиною 3 - 30 мм, в деяких випадках до 50 мм, діаметром 13 - 20 мкм. Найбільш прийнятною з точки зору міцності та технологічних характеристик, є довжина 12 мм, процентний вміст 0,2%. Поліпропіленове фіброволокно виготовляється безперервним методом з гранул чистого поліпропілену шляхом екструзії та витяжки при нагріванні. Доцільним є використання фібри ТОВ «ДПФ» з діаметром 20 мкм, довжиною 12 мм і витратою 1,0 кг/м³. Сталева фібра є самим міцним і затребуваним матеріалом. Вона може бути отримана різними способами: шляхом різання сталевих дротів або тонкого листа, з токарної стружки, з відходів виробництва (наприклад, з відпрацьованих канатів) і т. д. Довжина фібри залежить від технології її виготовлення. Експериментальні дослідження різних авторів показують, що наявність петель на кінцях фібри різко збільшує індекс зчеплення з цементним розчином. У зв'язку з цим найбільш прийнятною є фібра анкерна «Челябинка», яка має більш високі фізико-механічні характеристики порівняно з іншими видами фібр. Вона виготовляється із сталевих прокатів (стрічка, лист) і являє собою сталеву смужку, що має на кінцях анкери у вигляді сегментів кола. Торці смужки розгорнуті відносно один одного на довільний кут. Таким чином, для базальтової, поліпропіленової та сталеві фібр були визначені оптимальні довжина, діаметр і процентний чи масовий вміст. **Наукова новизна.** В результаті проведеного аналізу були обрані оптимальні параметри фібрового армування (довжина, діаметр, процентний вміст) для різних видів фібр з метою подальших досліджень теплофізичних та фізико-механічних характеристик бетонів на їх основі. **Практична значимість.** Зростання обсягів застосування бетонів і зміна умов експлуатації конструкцій вимагає постійного удосконалення бетону. На підставі аналізу літературних джерел систематизовано дані щодо найбільш розповсюджених видах фіброволокна. Це допоможе обрати характеристики фібробетону є оптимальним співвідношенням ціна – міцність та суттєво покращити міцнісні характеристики бетону. Вивчення літературних джерел показує також, що практично відсутні дані про міцність фібробетону при температурних впливах. Це стимулює нові експериментальні та теоретичні дослідження різних видів фібробетону при пожежі.

Ключові слова: фібробетон; композит; базальтова фібра; поліпропіленова фібра; сталеві фібра; вміст фібри; розміри фіброволокна

CHOICE OF RATIONAL PARAMETERS OF FIBER REINFORCEMENT

M. A. VEREVICHEVA¹, Ph. D in Technical Sciences, associate professor

A. A. BERESTYANSKAYA^{2*}, associate professor,

S. B. DERIZEMLYA³, engineer

¹ Department of Building Mechanics and Hydraulics, «Ukrainian State University of Railway Transport», sq. Feyerbakh, 7, 61050, Kharkov, Ukraine, tel.+38 (057) 730-10-70, e-mail: budmekh@ukr.net

^{2*} Department of Building Mechanics and Hydraulics, «Ukrainian State University of Railway Transport», sq. Feyerbakh, 7, 61050, Kharkov, Ukraine, tel.+38 (057) 730-10-70, e-mail: Anastasiia.Berestianska@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-8886-836X

³ Department of Building Mechanics and Hydraulics, «Ukrainian State University of Railway Transport», sq. Feyerbakh, 7, 61050, Kharkov, Ukraine, tel.+38 (057) 730-10-70, e-mail: budmekh@ukr.net

Summary. Purpose. One of the ways of improving building material composites is to make composites, while working together dissimilar materials gives an effect equivalent to the creation of a new material whose properties are both quantitatively and qualitatively different from its components. The most promising in this direction is dispersed concrete reinforcement using various types of fibers. Distributing throughout the concrete matrix, fiber provides a three-dimensional reinforcement. The purpose of this article is to conduct a comparative analysis of the strength characteristics of various types of fiber reinforcement for different types of effects, on the basis of which the price - the strength characteristics of the reinforcement (length and diameter of fiber filaments, or the percentage content by weight fiberglass) are determined. Research is conducted for the basalt, polypropylene and steel fibers. **Methods.** On the basis of experimental studies by different authors the influence of the size and content of the fiberglass on the strength characteristics of the fiber-reinforced concrete for each type of fibers has been given. **Results.** Basalt fiber is basalt fiber pieces in the form of friable monofilaments length of 3 ... 30 mm, in some cases up to 50 mm, diameter of 13 ... 20

m. The most acceptable from the point of view of strength and processability is length 12 mm, the percentage of 0.2%. Polypropylene fibrovloknno is made from pure polypropylene under continuous process by extrusion and stretching while heating. It is efficient to use fibers of "DIIF" with a diameter of 20 mm and a length of 12 mm and a rate of 1.0 kg / m³. The steel fiber is the most durable and popular material. It can be obtained in various ways: by cutting a steel wire or a thin sheet of turnings, from waste products (for example, from waste cables) and etc. The length of the fibers depends on the technology of its manufacture. Various authors' experimental studies show that the presence of the loops at the ends of the fibers greatly increases the index of adhesion to cement mortar. In this connection, the most suitable anchoring fiber is "Chelyabinka", which has high physical and mechanical characteristics in compared with other types of fibers. It is made of rolled steel (tape, sheet), and a steel strip having at the ends of the anchors in the form of segments of a circle. The ends of the strips are unfolded from each other by an arbitrary angle. Thus, for basalt, polypropylene and steel fibers have been the optimal length, diameter and weight, or the percentage content. **Scientific novelty.** As a result of the analysis optimal parameters of fiber reinforcement (length, diameter, percent) were selected for various kinds of fibers in order to have a further research of thermal, physical and mechanical properties of concrete on their basis. **Practical significance.** The increase in the volume of using concrete and structural changes in operating conditions requires continuous improvement of concrete. Based on the analysis of literary sources the information about the most common types of fiberglass has been systematized. This will help to choose the characteristics of fiber-reinforced concrete with optimal price - strength, greatly increasing the strength characteristics of concrete. The study of literature sources also shows that there is practically no data on the strength of fiber-reinforced concrete at temperature influences. This stimulates new experimental and theoretical studies of different types of fiber-reinforced concrete on fire.

Key words: fiber concrete; composite; basalt fiber; polypropylene fiber; steel fiber; fiber content; size fiberglass

Введение

Одним из перспективных конструкционных строительных материалов являются дисперсно-армированные бетоны. Такие бетоны представляют собой одну из разновидностей обширного класса композиционных материалов, которые в настоящее время все более широко применяются в различных отраслях промышленности. Дисперсное армирование осуществляется волокнами – фибрами, равномерно распределенными в объеме бетонной матрицы, обеспечивая при этом его трехмерное упрочнение. Для этого используются различные виды фибр [14, 10, 22].

Фибробетон применяется для изготовления различных по назначению конструкций, и каждая из них предъявляет к нему свои специфические требования. Механические свойства композитов, армированных волокнами, зависят от количества волокон и их размеров. Для определения влияния процентного содержания волокон фибры на свойства фибробетона был проведен анализ последних исследований, в котором рассмотрены экспериментальные данные различных авторов по влиянию процентного или массового содержания фибры на прочностные и деформативные характеристики при различных видах деформаций. Рациональный выбор размеров и содержания фиброволокна дает возможность получить экономически выгодные материалы с улучшенными прочностными характеристиками.

Цель

Целью статьи является определить оптимальные размеры и процентное или массовое содержание базальтовой, стальной и полипропиленовой фибр в бетоне, используя имеющиеся литературные данные.

Методика

Прочностные и деформативные характеристики бетона в современных условиях эксплуатации не

всегда удовлетворяют поставленным требованиям. Рост объемов применения бетона в строительстве и использование его в более жестких условиях эксплуатации требует постоянного совершенствования материала с целью повышения его прочности, трещиностойкости, огнестойкости и иных характеристик. Одним из способов совершенствования свойств является создание композитных материалов. По определению А. Дитца, композит – это материал, в котором «совместная работа разнородных материалов дает эффект равносильный созданию нового материала, свойства которого и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих» [15]. Фибробетон полностью отвечает этим требованиям. Он состоит из двух разнородных материалов: из бетона и фибры, имеет четкую границу раздела между ними и обладает свойствами, которыми не обладает каждая составляющая в отдельности. Введение в бетон усиливающих добавок в виде фибр приводит к значительному повышению рабочих и эксплуатационных характеристик материалов. Фибра позволяет сделать материал более прочным, скрепляя внутреннюю структуру своими волокнами. Совместная работа бетона-матрицы и фибры происходит за счет сцепления по их поверхности или при помощи анкеров. Это относится ко всем видам фибр. Фибробетон можно рассматривать в виде двух матриц. Это бетонная матрица – основная, и вспомогательная – матрица из армирующих волокон. Эти матрицы взаимодействуют друг с другом в процессе работы [4].

Для различных видов фибр необходимо определить оптимальное с точки зрения соотношения цена – прочность размер и содержание фибры в бетонной смеси, поэтому рассмотрим каждую фибру отдельно.

Базальтовая фибра представляет собой отрезки комплексного базальтового волокна в виде рассычатых монофиламентов длиной 3...30 мм, в некоторых случаях до 50 мм, диаметром

13...20 мкм [19]. Группой ученых К. Л. Кудяковым, А. В. Невским и А. С. Ушаковой были проведены экспериментальные исследования по определению предела прочности при осевом сжатии и растяжении фибробетона с содержанием базальтового волокна 0,2...1 % [6]. Результаты их исследований приведены на рис. 1. Авторы делают вывод о том, что можно получить прирост предела прочности на осевое сжатие до 10...25 %, а на растяжение – до 15 % и предлагают оптимальный диапазон дозирования базальтового волокна 0,4...0,6 % от массы бетона. При более высоком содержании волокон они наблюдали неравномерное распределение фибры по объему бетона, образование комков из фибры и, как следствие, снижение прочностных характеристик. Однако, авторы приводят только процентное содержание фибры в фибробетоне и не дают никаких рекомендаций по характеристике самого волокна, а именно длине и диаметру.

А. Г. Новицкий и М. В. Ефремов приводят данные Научно-исследовательского института строительных конструкций г. Киева, в котором исследовались образцы, армированные базальтовым волокном длиной 10 мм, диаметром более 40 мкм и с коэффициентом армирования по весу 2, 3, 4 % [5, 9]. В результате были получены пределы прочности образцов в возрасте 28 суток на растяжение при изгибе 19, 20, 24 МПа соответственно. В результате был сделан вывод, что обладая высокой термостойкостью (до 800 °С), базальтовое волокно также повышает прочность на изгиб и растяжение.

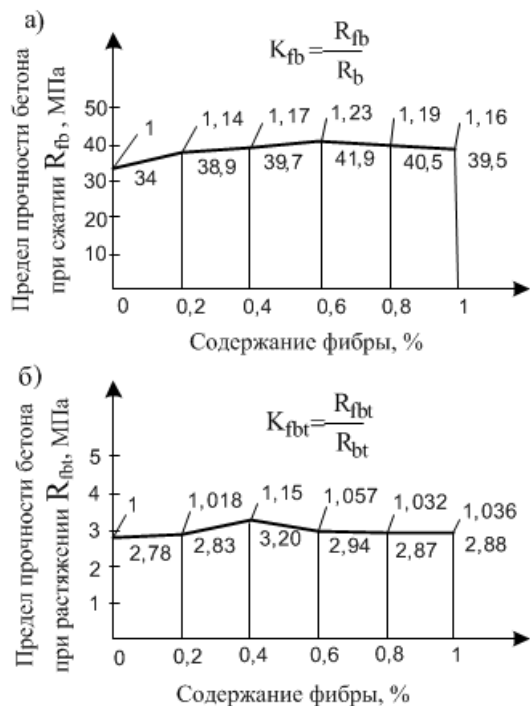


Рис. 1. Зависимости пределов прочности бетона при осевом сжатии (а) и растяжении (б) в абсолютных и относительных величинах от процента армирования базальтовым волокном / The dependence of the strength of concrete under axial

compression (a) and stretching (b) in absolute and relative terms on the percentage of basalt fibers

Исследования влияния процентного содержания фибры при изгибе и сжатии было проведено Н. Г. Василовской, И. Г. Енджиевской и И. Г. Калугиным [2]. В своих исследованиях они рассматривали базальтовое волокно различной длины: 6, 12, 18 мм. Было отмечено, что с увеличением длины волокна более 12 мм происходит образование так называемых «ежей», что негативно сказывается на прочностных свойствах бетонов, поэтому в исследованиях ограничились длиной волокна до 12 мм. В своих исследованиях они рассматривали фибробетон с процентным содержанием фибры 0,1...0,25 % от массы бетона и получили следующие результаты (таблица 1).

Авторами был сделан вывод, что наилучшие показатели к 28 суткам твердения имел фибробетон с процентным содержанием базальтовой фибры 0,2 %. Прочность при изгибе по сравнению с неармированным бетоном возросла на 100...160 %, при сжатии – на 35...50 %. Ими также было установлено, что дальнейшее повышение содержания волокна в фибробетоне приводит к образованию «ежей», приводящих к неравномерной структуре материала, в результате чего ухудшаются прочностные характеристики.

Проанализировав зависимость прочностных характеристик от длины, диаметра и процента армирования, можно сделать вывод, что наиболее приемлемым с точки зрения соотношения цена - прочность является базальтовое волокно длиной 12 мм и процентным содержанием 0,2 %, при этом предел прочности при изгибе составляет 30,7 МПа, а при сжатии 88,6 МПа.

Таблица 1

Прочность фибробетона / The strength of fiber concrete

№ опыта	Кол-во волокна, % от массы цемента	Длина волокна, мм	Прочность в возрасте 28 суток, МПа	
			при изгибе	при сжатии
1	–	–	11,7	60,0
2	0,10	6	15,4	62,5
3	0,10	12	17,5	64,9
4	0,10	18	18,3	63,6
5	0,15	6	23,1	75,3
6	0,15	12	24,6	77,8
7	0,15	18	25,3	77,2
8	0,20	6	28,5	85,4
9	0,20	12	30,7	88,6
10	0,20	18	31,4	81,7
11	0,25	6	32,5	80,3
12	0,25	12	34,1	76,8
13	0,25	18	33,3	73,9

Полипропиленовое фиброволокно изготавливается непрерывным методом из гранул чистого полипропилена путем экструзии и вытяжки при нагревании. В исследованиях Т. Э. Рымара и А. С. Шишиной [16] приводятся экспериментальные данные о влиянии на прочность фибробетона процентного содержания и размера полипропиленовой фибры. Была испытана полипропиленовая фибра с длиной волокон 2, 4 и 12 мм, содержание которой составляло 600...2000 г/м³. Данные о прочностных характеристиках при сжатии и при изгибе в зависимости от содержания фибры приводятся на рис. 2.

Авторами был сделан вывод, что оптимальным является использование фибры длиной 12 мм и её содержание 900 г/м³. Дальнейшее увеличение содержания фибры незначительно увеличивает прочность при существенном возрастании цены.

В исследованиях С. Н. Толмачева показано, что для бетона с крупностью зерен 20 мм сочетание фибры с длиной волокон 6 и 12 мм и диаметром 17...21 мкм, при общем её расходе 0,9...1,0 кг на 1 м³ бетонной смеси дает существенный прирост прочности. При этом для классов бетона В30...В40 прочность на растяжение при изгибе возрастает на 30 %, на сжатие – на 16 %. При введении фибры длиной 12 мм при расходе 1,0 кг/м³ прочность на сжатие в возрасте 28 суток составляет 49,67 МПа, на растяжение – 6,36 МПа [17]. По мнению автора, введение фибры производства ООО «ДПФ», которая отвечает ТУ У 25-2-32781078–004, дает лучшие прочностные и физико-механические характеристики по сравнению с фибрами других производителей [3].

Согласно данным Ф. Н. Рабиновича и С. М. Бабаева [13], оптимальной длиной полипропиленовой фибры является 6 мм, диаметр 20 мкм, а расход – 0,8 кг/м³. Ими отмечено, что низкомолекулярные полимерные волокна, не могут привести к повышению прочности бетонной матрицы. Авторами наблюдалось снижение прочности при длине фибры 12 и 18 мм с расходом 1,6 кг/м³. При испытании призм на изгиб предельное значение прочности отмечали при длине волокон 12 мм с расходом 1,6 кг/м³. В ходе их испытаний оптимальной оказалась длина волокон 6 мм. Предел прочности при расходе 0,8 кг/м³ увеличился на 16 % при сжатии, и на 27 % при растяжении.

В работе В. И. Морозова и Ю. В. Пухаренко [8] отмечено, что при концентрации полипропиленовой фибры из низкомолекулярных полимерных волокон в пределах содержания 1...3 % получается композит, который не уступает по прочностным характеристикам сталефибробетону, и при этом является более экономичным. Однако это не согласуется с данными Ф. Н. Рабиновича и С. М. Бабаева

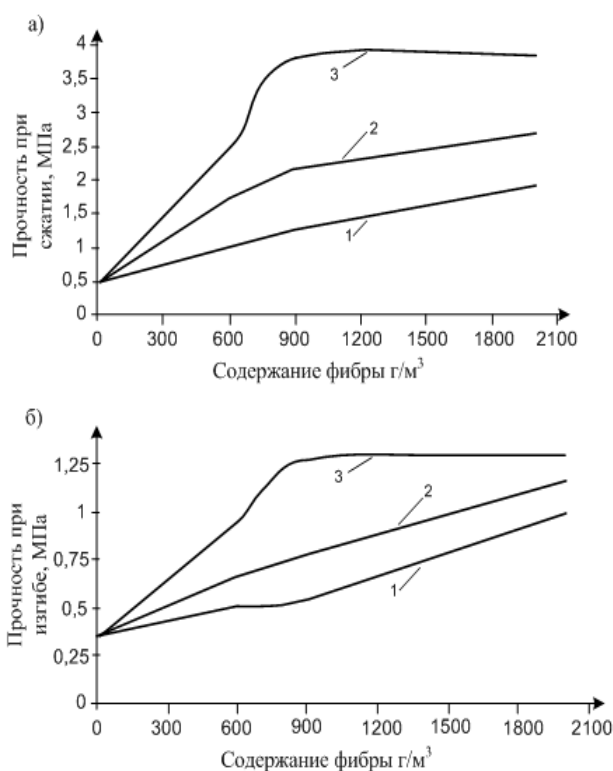


Рис. 2. Зависимости предела прочности при сжатии (а) и при изгибе (б) фибробетона от содержания фибры (1 - длина фибры 2 мм, 2 - длина фибры 4 мм, 3 - длина фибры 12 мм) / Dependence of compressive strength (a) and flexion (b) of fibre-concrete on the fibre content (1 – length of fibre 2 мм, 2 – length of fibre 4 мм, 3 – length of fibre 12 мм)

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать вывод, что наиболее приемлемой является полипропиленовая фибра производства ООО «ДПФ» диаметром 20 мкм, длиной 12 мм и расход 1,0 кг/м³.

Стальная фибра является самым прочным и востребованным материалом [21]. Она может быть получена различными способами: путем резки стальной проволоки или тонкого листа, из токарной стружки, из отходов производства (например, из отработанных канатов) и т. д. При использовании проволоочной и токарной фибры смеси получаются однородными, а при использовании листовой и фрезерованной наблюдается расслаивание и образование участков, не содержащих фибр. При использовании фрезеровочной и листовой фибры получение однородной структуры затруднительно. Максимальный прирост прочности при сжатии и растяжении при изгибе был получен для сталефибробетона с проволоочной фиброй [17]. Длина фибры зависит от технологии её изготовления, при этом чем больше длина фибры, тем больше необходимо усилия для её выдергивания. Однако существует некоторое критическое значение длины после достижения которого механические свойства сталефибробетона не улучшаются за счет того, что фибра начинает рваться.

Диаметр фибры также влияет на свойства сталефибробетона. Форма поперечного сечения стальной фибры может быть различной, поэтому часто пользуются приведенным диаметром. При уменьшении диаметра эффективность фибрового армирования увеличивается, однако при этом усложняется технология приготовления смеси и изготовления изделия. Важными характеристиками фибры, влияющими на физико-механические и деформативные характеристики, являются отношение длины к диаметру, форма, а также состояние поверхности. Чем больше насыщение смеси фибровыми волокнами, тем больше контактных зон и тем лучше прочностные и деформативные характеристики материала.

Т. Фудзи предлагает определять минимальное содержание волокон в матрице в зависимости от напряжений, возникающих в конструкции [19].

По мнению австрийских ученых, оптимальный баланс между ценой и эксплуатационными качествами достигается при содержании фибры 75 кг/м³ бетона [20].

По данным К. В. Талантовой [17], параметры фибры должны варьироваться в таких пределах: диаметр 0,3...1,2 мм, отношение длины к диаметру 50...120, объемное содержание 0,5...3,0 %. Оптимальные значения этих параметров зависят от конкретного вида конструкции. По её мнению, целесообразный процент объемного фибрового армирования составляет 1,25 %, при этом класс бетона-матрицы должен колебаться в интервале В15...В30. Дальнейший рост класса бетона-матрицы приводит к увеличению коэффициента расхода фибр.

При определении оптимального диаметра К. В. Талантова предлагает выделять области рационального армирования. В результате ею было рачужено, что при работе сталефибробетона на растяжение целесообразным является диаметр фибры 0,50 мм и более, при этом имеет место наименьший коэффициент расхода фибры (рис. 3).

Талантова предлагает целесообразные области применения фибр в зависимости от назначения элемента конструкции, например, для несущих изгибаемых элементов, она рекомендует проволочную фибру диаметром 0,3...0,5 мм, соотношение длины к диаметру 100...125 или диаметром 0,7...1,2 мм с соотношением 200...400.

Ученые Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков [11] рекомендуют принимать относительную длину фибры из проволоки с соотношением 80...100. Авторы считают, что наиболее выгодным является использование полуфабрикатов прокатного металлургического производства, т. к. производство такой фибры можно реализовать в промышленных масштабах, что делает её более дешевой. Такая фибра имеет большую, по сравнению с проволочной боковую поверхность, что является резервом в повышении прочности фибробетона.

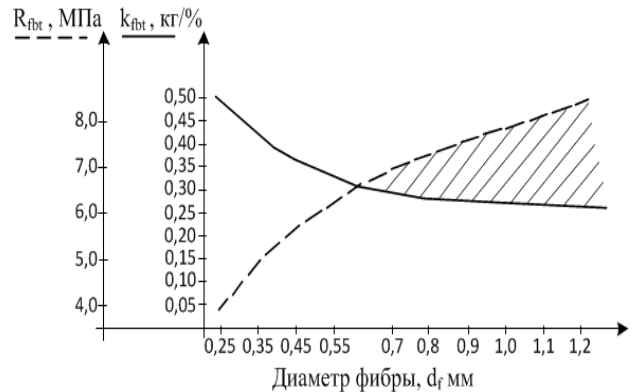


Рис. 3. Область рационального фибрового армирования в зависимости от расчетного сопротивления растяжению (R_{fib}), относительного коэффициента расхода фибровой арматуры (k_{fib}) / The management fiber reinforcement depending on the design tensile strength (R_{fib}), the relative flow coefficient fiber reinforcement (k_{fib})

Р. В. Лесовик и С. В. Клюев [7] провели экспериментальные исследования для определения кубиковой и призмной прочности для таких видов фибр:

- фибра стальная волнообразная, длина 30 мм, диаметр 0,8 мм;
- фибра стальная анкерная, длина 50 мм, диаметр 0,8 мм;
- фибра стальная плоская, длина 32 мм, ширина 3,2 мм.

Результаты их исследований приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы существенного отличия прочностных характеристик не наблюдается, однако для волновой фибры они незначительно выше, чем для других видов фибр, но авторами не приводится процентное содержание фибры в образцах.

Таблица 2

Результаты испытаний мелкозернистых бетонных образцов, в том числе дисперсно армированных стальной фиброй / The test results of fine grain specimens of concrete, including reinforced steel fiber dispersion

Определяемая характеристика	Размерность	Без фибры	Виды фибр		
			Плоская фрезерованная	Анкерная	Волновья
Кубиковая прочность	МПа	50,2	56,3	55,8	57,4
Призмная прочность	МПа	35,0	39,2	38,7	39,9
Прочность на растяжение при изгибе	МПа	13,7	15,9	16,6	16,8
Модуль упругости	МПа	35,8 · 10 ³	41,1 · 10 ³	39,8 · 10 ³	41,7 · 10 ³

По мнению К. В. Талантовой [17], наличие петель на концах фибры резко увеличивает индекс сцепления с цементным раствором. В связи с этим интересно рассмотреть фибру «Челябинка», которая изготавливается из стального листа по ТУ 1276–001–70832021–2005 и представляет собой разновидность анкерной фибры. Она изготавливается из стального проката (лента, лист) и представляет собой стальную полосу имеющую на концах анкера в виде сегментов окружности, радиусно сопряженных с прямыми участками полосы. Торцы полосы развернуты относительно друг друга на произвольный угол. «Челябинка» имеет более высокие физико-механические характеристики по сравнению с другими видами фибр, что подтверждается результатами испытаний ОАО ЦНИИС (табл. 3). При этом рекомендуемая дозировка фибры зависит от назначения конструкции и для жилых домов – 25...50 кг/м³.

Таблица 3

Результаты испытаний фибробетонных образцов / The test results of fiberconcrete specimens

Вид испытания	Челябинка	HAREX	DRAMIX	МагФибра-строй
	R, МПа	R, МПа	R, МПа	R, МПа
Сжатие	49,4	50,0	47,2	49,2
Растяжение	3,34	2,82	2,72	2,64
Изгиб	7,89	6,57	7,41	5,57

В работе С. А. Бугаевского было предложено полидисперсное армирование. При этом размеры фибр назначали, исходя из основных компонентов бетонной смеси. Предлагается использование двух размеров стальной фибры. Первый размер (36 мм) сопоставляется с фракцией щебня 20...40 мм, а длина второй фибры не превышает 5 мм, что соответствует крупности мелкого заполнителя песка [1, 12].

Проанализировав различные виды стальной фибры, можно сделать вывод, что наиболее рациональным является использование фибры «Челябинка», потому что эта фибра изготавливается в заводских условиях по ТУ, что исключает различные её дефекты. Листовая, проволочная, токарная и фрезеровочная фибры получают либо путем резки канатов или листа, либо из отходов производства, поэтому эти фибры могут содержать дефекты исходного материала и дефекты, полученные в результате её изготовления.

Результаты

На основании анализа литературных данных были определены рациональные характеристики для базальтовой, полипропиленовой и стальной фибр, а именно:

- базальтовую фибру рекомендуется брать длиной 12 мм и процентным содержанием 0,2 %;
- полипропиленовую длиной 6 мм диаметром 20 мкм, и расходом 0,9 кг/м³;
- стальную – фибру «Челябинку» с расходом 25...50 кг/м³.

Научная новизна и практическая значимость

Возрастание объема применения бетона и изменение условий эксплуатации конструкций требует постоянного совершенствования бетона. На основании анализа литературных источников систематизированы сведения о наиболее распространенных видах фиброволокна. Это поможет выбрать характеристики фибробетона с оптимальным соотношением цена – прочность, существенно повысив прочностные характеристики бетона. Изучение литературных источников показывает также, что практически отсутствуют данные о прочности фибробетона при температурных воздействиях. Это стимулирует новые экспериментальные и теоретические исследования различных видов фибробетона при пожаре.

Выводы

Показана целесообразность дисперсного армирования бетона. Рассмотрены различные виды фибрового армирования (базальтовая фибра, полипропиленовая фибра, стальная фибра). Дана краткая характеристика каждой из фибр. Предложены практические рекомендации по оптимальному выбору размеров и содержанию фибры в фибробетоне для получения оптимального соотношения цена – прочность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бугаевский, С. А. Методы возведения каркасных систем нового типа / С. А. Бугаевский // Вестник Харьковского национального автомобильного университета. – Харьков, 2012. – Вып. 58. С. 78–84.

Bugaevskiy S. A. Metody vozvedeniya karkasnykh sistem novogo tipa [Methods for the construction of a new type of frame systems]. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilnogo universiteta* [Kharkov National Automobile and Highway University], 2012, issue 58, pp. 78–84. <http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/425/1/13.pdf>

2. Васильовская, Н. Г. Цементные композиции дисперсно-армированные базальтовой фиброй / Н. Г. Васильовская, И. Г. Енджиевской, И. Г. Калугин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2011. – Вып. 3. – С. 153-158

Vasilovskaya N. G., Yendzhievskaya I. G., Kalugin I. G. Tsementnie kompozitsii dispersno-armirovannye bazaltovoy fibroy [Cement compositions disperse-reinforced by the basalt fiber]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Tomsk State University of Architecture and Stroitel'nyy], 2011, issue 3, pp. 153-158. http://www.tsuab.ru/upload/files/additional/17_Vasilovskaja_fil_e_3132_3372_8522.pdf

3. Вироби з бетону, армовані полімерними волокнами / СОУ 20.6-32781078-001:2015 Товариство з обмеженою відповідальністю «ДПФ», Дніпропетровськ, 2015

Virobi z betonu, armovani polimernimi voloknami / SOU 20.6-32781078-001:2015 *Tovaristvo z obmezhenoiu nidpovidalnostiu «DPF»*, Dnipropetrovsk, 2015

4. Коваленко, В. В. Влияние направленного ориентирования фибр на характер деформирования фибробетона / В. В. Коваленко, Ю. А. Смоляк // Перспективы освоения подземного пространства: 3-тя Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів та студентів (2009) / нац. горний ун-т Дніпропетровськ, 2009. – С. 84–88

Kovalenko V. V. Vliyanie orientirovaniya fibr na kharakter deformirovaniya fibrobetona [Influence of directional orientation of fibers in the fiber concrete character deformation]. *Perspekriivi osvoeniya podzemnogo prostranstva : Tretya mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya molodykh uchennykh, aspirantiv ta studentiv (2009)* [3rd International Scientific Conference of young scientists and students]. Dnepropetrovsk, 2009, pp. 84–88 <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/2804>

5. Крутаев, А. С. Композиционные материалы на основе вяжущих / А. С. Крутаев, С. Т. Сулейменов, З. А. Естемесов. – Киев, АН УССР ИПМ, 1991. – С.21.

Krutaev A. S., Suleymenov S. T., Yestemesov Z. A. Kompozitsionnie materialy na osnove vyazhushchikh [Composite materials based binders] AN USSR IPM, 1991. 21 p.

6. Кудяков, К. Л. Влияние дисперсного армирования базальтовым волокном на прочностные свойства бетона / К. Л. Кудяков, А. В. Невский, А. С. Ушакова // X Международная конференция студентов и молодых ученых “Перспективы развития фундаментальных наук” (23.04-26.04.2013) / Томский госуд. Архитект.-строит. Университет – Томск, 2013, - С. 708-710.

Kudiyakov K. L., Nevskiy A. V., Ushakova A. S. Vliyanie dispersnogo armirovaniya bazaltovym voloknom na

prochnostnie svoystva betona [Influence of disperse reinforcement by basalt fiber on the strength propeties of concrete]. *X Mezhdunarodnaya konferentsiya studentov I molodykh uchennykh “Perspektivi razvitiya fundamentalnykh nauk”* (23.04-26.04.2013) Tomsk state university of architecture and building, Russia, Tomsk, 2013, pp. 708-710. <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C21/239.pdf>

7. Лесовик, Р. В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций / Р. В. Лесовик, С. В. Клюев // Инженерно-строительный журнал. Санкт - Петербург, 2012. Вып. 3. – С. 41-47.

Lesovik R. V., Kluev S. V. Fibrobeton na kompozitsionnykh vyazhushchikh i tekhnogennykh peskakh Kurskoy magnitnoy anomalii dlya izgibaemikh konstruksiy [Fiber concrete containing composite binders and technogenic sands of Kursk magnetic anomaly for flexural structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, Sankt-Peterburg, 2012, issue 3, pp. 41-47.

8. Морозов, В. И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / В. И. Морозов, Ю. В. Пухаренко // Вестник Московского государственного строительного университета, 2014. – Вып. 3. – С. 189-196.

Morozov V. I., Pukharenko Yu. V. Effektivnost primeneniya fibrobetona v konstruksiyakh pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [The effectiveness of fiber-reinforced concrete in structures under dynamic loading]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering], 2014, issue 3, pp. 189-196.

9. Новицкий, А. Г. Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов / А. Г. Новицкий, М. В. Ефремов // Научно-технічний збірник «Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка» Київ. –2010. – Вып. 36. – С. 22-26.

Novitskiy A. G., Efremov M. V. Aspekty primeneniya bazaltovoy fibry dlya armirovaniya betonov [Aspects of application of basalt fibers for concrete reinforcement]. *Naukovo-tekhnichnii zbirnik «Budivelnii materialy, virobi ta sanitarna tekhnika» – Scientific and technical collection “Construction materials and sanitary equipment»*, Kyiv, 2010, issue 36, pp. 22-26.

10. Опанасенко, Е. В. Виды фибрового армирования / Е. В. Опанасенко, А. А. Берестянская // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Збірник наукових праць Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне, 2015. – Вып. 30. – С. 57–64.

Opanaseko E. V., Berestyanskaya A. A. Vidy fibrovogo armirovaniya [Types fiber reinforcement]. *Zbirnik naukovykh prats Natsionalnogo universytetuvodnogo gospodarstva ta pryrodokorystuvannya* [Collected Works of the National University of Water and Environment] Resursoekonomichni materialy, konstruksiyi ta sporudi - Resursoekonomni materialy, constructions and buildings, Rivne, 2015, issue 30, pp. 57-64.

11. Пухаренко, Ю. В. Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Современные направления теоретических и прикладных исследований: междунар. науч.-практ. конф. (19.03-30.03.2013) Сборник научных трудов SWorld – Одесса, 2013. – С. 60-64.

Pukharenko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Effektivnost poliarmirovaniya fibrobetona stalnoy fibroy

raznogo tiporazmera [Efficiency poliarmirovaniya fiber-reinforced concrete steel fiber of different sizes]. *Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (19.03-30.03.2013)* [International scientific-practical conference] *Sbornik nauchnykh trudov SWorld. Odessa, 2013*, pp. 60-64.
<http://www.sworld.education/konfer30/817.pdf>

12. Пухаренко, Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойства фибробетонов : дис....д-ра техн. наук : 05.23.05 / Пухаренко Юрий Владимирович. – Санкт-Петербург, 2004. – 316 с.

Pukharenko Yu. V. *Nauchnie i prakticheskie osnovi formirovaniya struktury i svoystva fibrobetonov* Dokt, Diss. [Scientific and practical bases of formation of structure and properties of fiber-reinforced concrete. Doct. Diss.]. Sankt – Peterburg, 2004. 316 p.

13. Рабинович, Ф. Н. Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона / Ф. Н. Рабинович, С. М. Бабаев // Научно-технический и производственный журнал «Промышленное и гражданское строительство». – Москва, 2009. – Вып. 8. – С. 28-31.

Rabinovich F. N., Babaev S. M. *Effektivnost primeneniya polimernykh fibr dlya dispersnogo armirovaniya betona* [The effectiveness of polymeric fibers to disperse reinforcement of concrete]. *Nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyy zhurnal «Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo» – Scientific and technical and industrial journal "Industrial and civil construction*, Moscow, 2009, issue 8, pp. 28–31.
<http://www.pgs1923.ru/russian/rindex.htm>

14. Рамачандран, В. Наука о бетоне / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – Москва : Стройиздат, 1986. – 279 с.

Ramachandran V., Feldman R., Boduen Dzh. *Nauka o betone* [Science of Concrete]. Moscow, Sroyizdat, 1986. 279 p.

15. Рудой, Б. Л. Композиты / Б. Л. Рудой. – Москва : Московский рабочий, 1976. – 144 с.

Rudoy, B. L. *Kompozity* [Composites]. Moscow : Moskovskiy rabochiy, 1976. 144 p.

http://www.nglib.ru/book_view.jsp?idn=005123&page=1&for mat=free

16. Рымар Т. Э. Свойства фибробетона с полипропиленовой фиброй / Т. Э. Рымар, А. С. Шишина // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2012. – Вип. 17(188). – С. 109-112.

Rymar T. E., Shishina A. S. *Svoystva fibrobetona s polipropilenovoy fibroy* [The properties of fiber-reinforced concrete with polypropylene fibers]. *Vestnik Skhidnoukrainskoho natsionalnogo universytetu im. Volodymyra Dalia* [East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], Lugansk, 2012, issue 17(188), pp. 109-112.

http://www.sti.lg.ua/files/nauka/vestnik/vestnik_17_188_ch1_012.pdf

17. Талантова, К. В. Строительные конструкции с заданными свойствами на основе сталефибробетона : дис.... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Талантова Клара

Васильевна ; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2009. – 189 с.

Talantova K. V. *Stroitelnie konstruksii s zadannymi svoystvami na osnove stalefibrobetona* Dokt, Diss. [Building structures with desired properties based on stalefibrobetona] Barnaul, 2009, 189 p.

18. Толмачев, С. Н. Свойства дорожных бетонов с полимерной фиброй / С. Н. Толмачев, И. Г. Кондратьева, Л. Д. Маракина, А. В. Матяш, С. Е. Солдатенко // Науковий вісник будівництва Харківського національного університета будівництва та архітектури. – 2008. – Вип. 48. – С. 150-154.

Tolmachev S. N., Kondrateva I. G., Marakina L. D., Matyash A. V., Soldatenko S. E. *Svoystva dorozhnykh betonov s polimernoy fibroy* [The properties road of of concrete with polymer fiber]. *Naukovyi visnyk budivnytstva Kharkivskogo natsionalnogo universytetu budivnytstva ta arkhitekturi* [Scientific herald the construction of Kharkiv National University of Construction and Architecture], 2008, issue 48, pp. 150-154.

19. Фудзи, Т. Механика разрушения композиционных материалов / пер. с яп. Т. Фудзи, М. Дзакко. – Москва: Мир, 1982. – 232 с.

Fudzi T., Dzako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Fracture mechanics of composite materials] Moscow, Mir, 1982. 232 p.

20. Artemenko, S. E. Polymer Composite Materials Made from Carbon, Basalt, and Glass Fibers / S. E. Artemenko Structure and Properties, *Fiber Chemistry* 2003. – 35(3). – pp. 226-229.

Artemenko S. E. *Polymer Composite Materials Made from Carbon, Basalt, and Glass Fibers, Structure and Properties, Fiber Chemistry*, 2003, issue 35(3), pp. 226-229.

21. Bhikshma, V. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing steel fibers / V. Bhikshma, K. Manipal // *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2012. – 13 (2). – pp. 155-164.

Bhikshma V., Manipal K. *Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing steel fibers*, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2012, issue 13(2), pp. 155-164.

22. Brandt, A. M. Cement – Based Composites / A. M. Brandt : *Materials, Mechanical Properties and Performance* / Spon Press, 2009. – 2 edition. March. – 544 p.

Brandt A. M. *Cement – Based Composites, Materials, Mechanical Properties and Performance*, Spon Press, 2009. 2 edition March, 544 p.

23. Klyuyev, S.V. Fiber Concrete on Composite Knitting and Industrialsand KMA for Bent Designs / S.V. Klyuyev, R. V. Lesovik, A. V. Klyuyev, A. V. Ntrebenko, N. V. Kalashnikov // *World Applied Sciences Journal*, 2014.– V. 30.– № 8. – P. 964–969.

Klyuyev S. V., Lesovik R. V., Klyuyev A. V., Ntrebenko A. V., Kalashnikov N. V. *Fiber Concrete on Composite Knitting and Industrialsand KMA for Bent Designs – World Applied Sciences Journal*, 2014. V. 30, no 8, pp. 964–969.

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. С. Н. Толмачевым (Украина); д-ром.тех. наук, проф. Д. А. Плугиным (Украина)

Поступила в редколлегию __.08.2015

Принята к печати __.08.2015