

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВОВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Токмеилова Н.¹, Акмалайулы К.²

⁽¹⁾студент Казахского национально исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, tokmeilova.03@mail.ru

⁽²⁾профессор Казахского национально исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, kakmalaev@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы, посвященные проектированию составов дисперсно-армированных фибробетонов. Разработана методика проектирования составов полиармированных фибробетонов с заданной прочностью на растяжение при изгибе и вязкостью разрушения. С помощью предложенной методики проведен расчет состава фибробетона.

Ключевые слова: фибробетон, сталефибробетон, цемент, прочность, волокно, фиброволокно, армирование, фибра, растяжение.

БОЛОТ БУЛАЛУУ ТЕМИР-БЕТОНДУН КУРАМЫН АНЫКТОО

Токмеилова Н.¹, Акмалайулы К.²

⁽¹⁾К.И.Сатпаев атындагы Казак Улуттык изилдөө техникалык университетинин студенти, tokmeilova.03@mail.ru

⁽²⁾К.И.Сатпаев атындагы Казак Улуттык изилдөө техникалык университетинин профессору, kakmalaev@mail.ru

Аннотация. Дисперстик-темир-булалуу темир-бетондун композицияларын долбоорлоого байланышкан маселелер каралат. Ийилүүдө жана сынууга бекемдикте берилген чоюлуу бекемдиги менен политемир-була-темир-бетондун композицияларын долбоорлоонун техникасы иштелип чыккан. Сунуш кылынган методду колдонуу менен була-темир-бетондун составы эсептелген.

Өзөктүү сөздөр: була-темир-бетон, болот-була-темир-бетон, цемент, бекем, була, айнек, арматура, була, чыңалуу.

DETERMINATION OF STEEL FIBER CONCRETE COMPOSITIONS

Tokmeilova N.¹, Akmalaiuly K.²

⁽¹⁾ student of the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, tokmeilova.03@mail.ru

⁽²⁾ Professor of the Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, kakmalaev@mail.ru

Abstract. Issues related to the design of compositions of dispersed-reinforced fiber-reinforced concrete are considered. A technique has been developed for designing compositions of polyreinforced fiber-reinforced concrete with a given tensile strength in bending and fracture toughness. Using the proposed method, the composition of fiber-reinforced concrete was calculated.

Keywords: fiber-reinforced concrete, steel-fiber-reinforced concrete, cement, strength, fiber, fiberglass, reinforcement, fiber, tension.

Введение. Разработка специальных цементов для высокопрочных бетонов и новые технологии открывают принципиально новые возможности синтеза прочности. Уже первые опыты по оптимизации гранулометрического состава вяжущих в начале 70-х годов выявили значительные резервы снижения водоцементного отношения и интенсификации реакций гидратации. Вслед за получением цементных камней с прочностью на сжатие свыше 250 МПа были получены так называемые DSP-композиты (уплотненные системы, содержащие гомогенно распределенные ультрамалые частицы). Эти материалы, включающие специально подготовленные цементы, микро-кремнезем, специальные заполнители и микро-волокна, за счет специальных технологических приемов при В/Ц=0,12-0,22 позволяют достичь прочности 270 МПа при высокой стойкости к коррозионным воздействиям и истиранию. Фибробетон получают путем смешивания фиброволокна и бетонного раствора. При этом немаловажным условием получения качественного материала будет соблюдение следующих условий:

- совместимость бетона-матриц и фиброволокна;
- соблюдение необходимого соотношения раствора и фибры;
- равномерное распределение фиброволокон в бетоне.

Свойства фибробетона напрямую зависят от материала, используемого в качестве фиброволокна.

К несомненным достоинствам фибробетона можно отнести его высокие эксплуатационные характеристики. Бетон, имеющий в своем составе фиброволокно, намного превосходит обычный по качеству, прочности и долговечности. Изделия из него приобретают устойчивость к истиранию и химическому воздействию, не деформируются в процессе эксплуатации и имеют повышенную прочность на разрыв и растяжение. Фибробетон практически не дает усадки и трещин.

Актуальность темы и постановка задач. Использование фиброволокна в качестве армирующего материала позволяет значительно снизить трудоемкость изготовления бетонных изделий. Такие конструкции не нуждаются в дополнительном усилении при помощи металлических каркасов и сеток. Такой фактор значительно ускоряет процесс строительства и избавляет от трудоемких затрат.

Равномерное распределение фиброволокон в толще бетона, обеспечивает его прочность по всей площади, чего невозможно добиться при обычном армировании. Поверхности фибробетона не страшны сколы и выщербины. Фибробетон, в отличие от обычного бетона, обладает устойчивостью к резким перепадам температуры. Конструкции из него имеют такие немаловажные в строительстве свойства, как водонепроницаемость, жаропрочность и морозоустойчивость. Бетон, с наполнением из фиброволокна, имеет значительно меньший вес, чем обычный с арматурой из

металлической сетки. Ему можно придать любую форму, что намного упрощает процесс возведения бетонных конструкций. Исключение этапа армирования металлической сеткой также позволяет уменьшить толщину бетонных плит и снизить расход бетонного раствора. Конструкции из фибробетона имеют более легкий вес и толщину, чем обычные, с металлическими сетками в качестве арматуры. Значительное снижение веса бетонных изделий, за счет отсутствия железной арматуры, легкости наполнителя и меньшей толщины, позволяет использовать их в качестве легких элементов декора и лепнины. Высокие технические характеристики фибробетона, обеспечивают конструкциям из него, прочность и долговечность. Срок службы таких конструкций превышает изделия из обычного бетона в 15-20 раз. Фибробетон, вследствие своей прочности, позволяет значительно уменьшить толщину конструкций, что в свою очередь, позволяет сократить расход бетонного состава и снизить затраты на строительство. Из недостатков фибробетона можно отметить его большую стоимость, по сравнению с обычным бетоном, что является следствием высоких затрат на его производство. Для строительства объектов XXII зимних Олимпийские игр 2014 года в Сочи и чемпионата мира по футболу 2018 года необходимо в ближайшие годы удвоить производство изгибаемых элементов, таких как балки, плиты, ригели. Успехи бетоноведения в конце XX-го века обеспечили возможность получения высокопрочных и высококачественных бетонов прочностью на сжатие выше 100 МПа, необходимых при строительстве высотных зданий, платформ для нефтедобычи в морях и океанических шельфах и других уникальных сооружений. Однако при существенном повышении прочности бетонов на сжатие прочность высокопрочных бетонов на растяжение при изгибе повышается незначительно, что снижает возможности и эффективность их применения. Для улучшения показателей перечисленных свойств бетонов применяется дисперсное армирование бетона волокнами (фиброй) – стальными, стеклянными, базальтовыми, целлюлозными, синтетическими, углеродными и др. Эффективность применения фибробетонных конструкций в этих случаях может быть достигнута за счет снижения трудозатрат на арматурные работы, сокращения расхода стали и бетона (за счет уменьшения толщины конструкций), совмещения технологических операций приготовления – бетонной смеси и ее армирования, что, в конечном итоге, приводит к снижению трудоемкости изготовления конструкций на 25 – 35% и экономии строительных материалов на 1 м³ готового изделия. Кроме того, эффективность использования фибробетона может выражаться в увеличении долговечности конструкций и снижении затрат на текущий ремонт. На сегодняшний день, наибольшее распространение получили стальные волокна в виде иголок, нарезанные из тонкой стальной проволоки с профилированной поверхностью для лучшего сцепления с бетоном. Аналогичные фибры можно нарезать из тонкого

стального листа. Изготовление фибр из стальных отходов позволяет значительно сократить потребление в строительстве дефицитной арматурной стали. Чтобы существенно снизить вязкость смеси применяют специальные добавки. Это органические поверхностно-активные вещества, вводимые в смесь в малых дозах – от нескольких тысячных долей процента до нескольких процентов к массе бетона. Экономическая эффективность фибробетонных конструкций по сравнению с железобетонными обуславливается за счет: большого снижения трудоемкости, материалоемкости; повышения долговечности; увеличения межремонтного ресурса; исключения недостатков, присущих стержневому армированию. Ценность волокон состоит в том, что они не только придают бетону новые свойства, но и открывают путь принципиально новой технологии изготовления строительных изделий. Армирование производится непосредственно в бетоносмесительных агрегатах, т.е. в бетономешалку загружают цемент, песок, щебень и сами волокна, перемешивают их и получают готовую к применению армированную бетонную смесь, которую заливают в форму. Время изготовления изделий сокращается практически вдвое. В связи со значительным повышением физико-механических свойств снижается материалоемкость элементов конструкций, что приводит к уменьшению веса зданий и сооружений.

Одной из главных задач при разработке составов фибробетонов является оптимизация геометрических параметров и размеров фибр, которая бы обеспечивала надежное сцепление волокон с матрицей композита при допустимых нагрузках. Эффективность дисперсного армирования и степень использования потенциальных возможностей фибры во многом зависят от ее взаимодействия с бетонной матрицей на границе раздела фаз. Именно прочность сцепления определяет характер разрушения фибробетона, происходящего в результате разрыва волокон при максимальных напряжениях или вытягивания их из матрицы после нарушения связи с ней. Величина сцепления, в свою очередь, зависит от площади боковой поверхности фибры, контактирующей с цементным камнем, и, значит, от ее формы и размеров.

Чаще всего разрушение фибробетона происходит за счет вытягивания волокон из-за нарушения связи на границе раздела фаз «волокно-матрица», следовательно, в результате повышения прочности сцепления фибры с матрицей можно добиться максимального использования прочностных свойств самого волокна, вплоть до его разрыва в момент разрушения композита. Сцепление волокна с матрицей композита – результат проявления адгезии и механического взаимодействия в зоне их контакта с цементным камнем. Таким образом, главным механизмом для увеличения прочности дисперсно-армированного бетона является непосредственно увеличение прочности сцепления армирующего волокна с бетонной матрицей.

В СПбГАСУ на кафедре технологии строительных материалов и метрологии разработан экспериментально-расчетный метод, в соответствии с которым определяется не просто прочность сцепления дисперсной арматуры с матрицей, например, путем ее выдергивания из бетона, а характеристика сцепления (τ), учитывающая расположение и ориентацию фибр, характер и условия их работы в матрице.

Суть методики определения показателя сцепления заключается в нахождении опытным путем такого минимального процента армирования, до которого вводимые волокна практически не проявляют армирующего эффекта, но после которого наблюдается устойчивый рост прочности композита.

Исходной смесью для проведения эксперимента является цементное тесто нормальной густоты, определяемое по ГОСТ 310.3 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Из общего замеса необходимо изготовить как армированные, так и неармированные (контрольные) образцы определенного состава.

По полученным в ходе испытаний результатам строится график зависимости «прочность на растяжение при изгибе - объемное содержание волокон», по которому определяется положение точки, характеризующей минимальный процент армирования, после которого наблюдался бы устойчивый рост прочности (рис. 1).

По полученным данным рассчитывается характеристика сцепления фибр с цементным камнем из теста нормальной густоты или непосредственно прочность самой фибры при испытании в цементном камне.

Характеристика сцепления:

$$\tau = \frac{R_{\phi} - 3,5 * R_{к.з} * \mu_{\min} - (1 - 4,5 \mu_{\min}) R_{ц,к}}{2 \frac{l}{d} \mu_{\min}} \quad (1)$$

где R_{ϕ} , R ($R = 1,4 R_{ц,к}$) и $R_{ц,к}$ - прочность фиброцемента, контактной зоны и цементного камня из теста нормальной густоты; μ_{\min} - общая объемная доля волокон; l и d - длина и диаметр фибры.

Прочность фибры:

$$R_{\phi} = \frac{R_{\phi} - 3,5 R_{к.з} * \mu_{\min} - (1 - 4,5 \mu_{\min}) R_{ц,к}}{\mu_{\min}} \quad (2)$$

Результаты исследования и рекомендации. При проведении исследований был использован портландцемент бездобавочный марки ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент». В табл. 1 представлены некоторые характеристики использованного

портландцемента, такие как тонкость помола, нормальная густота и сроки схватывания цементного теста, предел прочности при изгибе и сжатии в возрасте 7 и 28 суток; в табл. 2 приведен химический и минералогический состав портландцемента. В табл. 3 представлены характеристики армирующих волокон, из которой видно, что площадь боковой поверхности аморфно-металлической фибры в несколько раз превышает такую у используемой в ходе данного исследования стальной фибры (рис. 2) из проволоки эквивалентного диаметра.

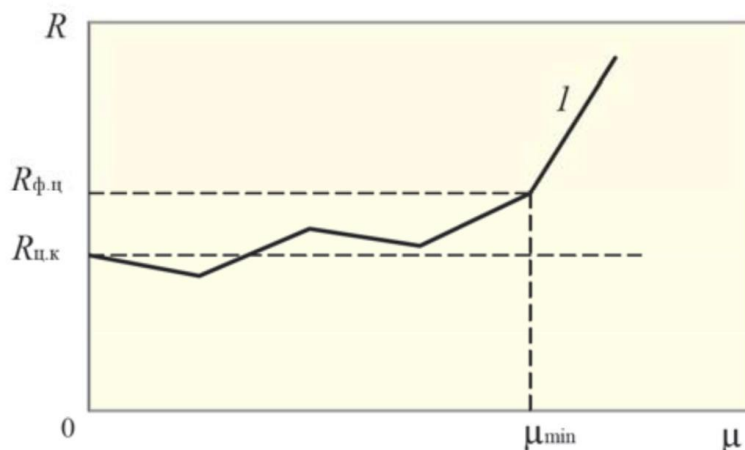


Рис. 1. Влияние объемного содержания волокон на прочность цементного камня: 1 — цементный камень, армированный высокомодульными волокнами

Таблица 1

Характеристики портландцемента

Портландцемент ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент»	Тонкость помола по удельной поверхности, см ² /г	Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания цементного теста, мин	Предел прочности при изгибе, МПа (в возрасте 7 суток)	Предел прочности при сжатии, МПа (в возрасте 7 суток)	Предел прочности при изгибе, МПа (в возрасте 28 суток)	Предел прочности при сжатии, МПа (в возрасте 28 суток)
Методика исследования	ГОСТ 310.2	ГОСТ 310.3	ГОСТ 30744	ГОСТ 30744	ГОСТ 30744	ГОСТ 30744	ГОСТ 30744
Результат исследования	2964,2	28,6	Начало схватывания 146; конец — 244	6,04	26,83	8,12	52,48

Разрушение композита, которое происходит в результате разрыва волокон (аморфно-металлическая фибра)

В данном случае для определения прочности аморфно-металлической фибры с учетом ее поведения в бетоне при нагружении изготавливалось две серии образцов размерами 4×4×16 см: неармированные (контрольные) образцы из цементного теста нормальной густоты и образцы, армированные аморфной металлической фиброй, с постепенным повышением процента объемного армирования. Разрушение таких образцов, как видно на рис. 3, сопровождалось разрывом аморфно-металлических волокон из цементной матрицы, что говорит об их хорошем сцеплении.

Результаты испытаний образцов приведены в табл. 4.

По завершении экспериментальной части методики был построен график зависимости прочности на растяжение при изгибе от процента объемного армирования (рис. 4).

На графике видно, что минимальное количество вводимых волокон, при котором в момент возникновения трещины в матрице они способны воспринимать нагрузку, составляет $m_{\min} = 0,7\%$; при использовании меньшего количества волокна материал может проявлять некоторые свойства композита, однако прочность в этом случае будет практически такой же, как и у неармированного образца.

Таблица 2

Минералогический и химический состав портландцемента

Марка цемента	Минералогический состав, %				Химический состав, %					
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O	CaO	SiO ₂	ППП*
ПЦ 500 Д0	68,8	10,3	8,9	11,3	0,9	2,34	0,75	50,1	14,0	3,56

* ППП — потери при прокаливании.

Таблица 3

Геометрические и физические параметры применяемой фибры

Вид фибры	Эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$, мм	Длина l , мм	Боковая поверхность, мм ²	Плотность материала ρ , г/см ³
Стальная из проволоки	0,3	22	0,94	7,8
Аморфная металлическая	0,3	30	6,06	7,8



Рис. 2. Аморфнометаллическая (слева) и стальная (справа) фибра



Рис. 3. Поверхность разрушенного фиброцементного образца, армированного аморфнометаллической фиброй

Таблица 4

Результаты измерения прочности на растяжение при изгибе фиброцементных образцов

Общий процент армирования по объему μ , %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Прочность на растяжение при изгибе $R_{\text{изг}}$, МПа	8,1	8,3	8,8	11,5	10,8	11,2	10,9	15,1	16,6	16,9	17,2

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Магдеев У. Х., Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И.** Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры // *Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура*. 2013. Вып. 31 (50). С. 132-135.
2. **Пухаренко Ю. В.** Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробето-Нов // *Строительные материалы*. 2004. № 10. С. 47-50.
3. **Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю.** Высокопрочный сталефибробетон // *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 9. С. 40-41.
4. **Пантелеев Д. А.** Оценка эффективности полиармирования фибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. № 6(41). С. 102-108.
5. **Пантелеев Д. А.** Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона // *Известия КГАСУ*. 2015. № 3 (33). С. 133-139.
6. **Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Морозов В. И.,**
7. **Магдеев У. Х.** Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры // *Academia. Архитектура и строительство*. 2016. № 1. С. 107-111.
8. **Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г.** Высотное строительство в Санкт Петербурге // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2005. № 9.
9. **Щербатых А.** Проблемы высотного строительства // *Весь бетон*. 2013.
10. **Блещик Н.П.** Основы прогнозирования технологических и физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона /
11. **Н.П. Блещик, А.Н. Рак, Д.С.Котов** Проблемы современного бетона и железобетона. Часть 2 Технология бетона. Минск, 2009. С. 132

Рецензент: **М.Б. Кусбекова**, к.т.н, ассоциированный профессор КазННТУ им. **К.И.Сатпаева**. m.kusbekova@satbayev.university