

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39

Соловьев В.Г., *Матюшин Е.В.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: matyushinev@mgsu.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ

Аннотация. В статье рассматривается влияние вида и объемного содержания стальной фибры на механические свойства сверхвысокопрочного фибробетона (СВФБ). Было использовано пять видов фибры: волновая размером 15/0,3 и 22/0,3 мм, прямая 13/0,3 и 13/0,2 мм и анкерная 30/0,5 мм. Объемное содержание фибры составляло от 0 до 3 %. В ходе проведения экспериментальных исследований определялись прочность на сжатие, изгиб, а также энергия разрушения при изгибе.

Было установлено, что увеличение объемного содержания стальной фибры приводит к увеличению всех рассматриваемых свойств вне зависимости от вида волокон. При этом наибольшее влияние фибра оказывает на энергию разрушения при изгибе, наименьшее – на прочность при сжатии. Были установлены линейные зависимости между механическими характеристиками СВФБ и фактором фибры, отражающим объемное содержание, длину и диаметр отдельного волокна. Угол наклона аппроксимирующих линий зависимостей «прочность при сжатии – фактор фибры» и «прочность при изгибе – фактор фибры» принимает различные значения в зависимости от вида применяемых волокон, при этом наибольшее значение угла наклона было обнаружено для волновой фибры. Было обнаружено наличие порогового значения фактора фибры, по достижению которого стальная фибра приводит к увеличению прочности при изгибе СВФБ.

При помощи обобщенного критерия качества было установлено, что волновая фибра с размерами 22/0,3 мм является оптимальной альтернативой прямой фибре 13/0,2 мм, повсеместно используемой для изготовления сверхвысокопрочных фибробетонов.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный фибробетон, стальная фибра, волновая фибра, прямая фибра, анкерная фибра, механические свойства.

Введение. Одним из актуальных направлений развития современной технологии бетонов является комплексное модифицирование бетона органическими и минеральными добавками, в результате чего могут быть получены строительные материалы с улучшенными свойствами или более низкой себестоимостью. Перспективным конструкционным материалом является сверхвысокопрочный фибробетон (СВФБ), получаемый путем объединения цементно-песчаной матрицы, модифицированной активными и инертными минеральными добавками в комплексе с суперпластифицирующими добавками, обладающей чрезвычайно плотной и прочной структурой, а также высокопрочной стальной фиброй различного вида и размеров [1–3]. В результате могут быть получены композиты с прочностью при сжатии до 250 МПа, осевом растяжении – до 35 МПа, при изгибе – до 50 МПа, модулем упругости – до 55 ГПа, а также высокой стойкостью к агрессивному воздействию окружающей среды [4–6]. СВФБ находит применение при строительстве автомобильных, железнодорожных и велосипедных мостов, ажурных фасадных стеновых панелей, для ремонта и восстановления бетонных и железобетонных конструкций, а также устройства упоров для преднапрягаемой арматуры [7–10]. К преимуществам конструкций из СВФБ относятся более низкая материал- и трудоемкость

при изготовлении, уменьшенная масса изделий, более высокая долговечность и эстетическая выразительность по сравнению с обычными железобетонными изделиями.

Одним из ключевых факторов, определяющих прочностные и деформативные свойства СВФБ, является выбор вида и объемного содержания фибрового армирования. Как правило, большинство некоммерческих и коммерческих составов, например, таких как Ductal, SEMTEC_{MULTISCALE} армируются фиброй прямого профиля, объемное содержание которой может достигать 11 % [5, 11]. Относительно высокое объемное содержание фибры обеспечивает одно из наиболее существенных преимуществ СВФБ по сравнению с рядовыми и высокопрочными бетонами – высокая прочность на осевое растяжение, что позволяет отказаться от поперечной арматуры в изгибаемых элементах, а в ряде случаев и от продольной. В различных исследованиях было установлено, что стальная фибра также приводит к повышению прочности на сжатие до 35 %, растяжении при изгибе и раскалывании – до 56–230 % в зависимости от вида и содержания волокон [12–14]. Наряду с прочностными характеристиками, стальная фибра приводит к повышению относительной предельной деформации при растяжении и сжатии [15, 16]. Введение

стальной фибры приводит к небольшому увеличению модуля упругости, что соответствует известному «правилу смесей», при этом величина коэффициента Пуассона остается практически неизменной [17]. Помимо прямой фибры в фибробетонах используются волокна с деформированным профилем – анкерная, волновая или спиральная. К преимуществам этих видов волокон относится более высокая прочность сцепления фибры с бетонной матрицей за счет механической анкерной отгибов, что приводит к более высоким прочностным характеристикам фибробетона. Зарубежными авторами проведены обширные испытания СВФБ с анкерной и спиральной фиброй [4, 18–20]. Полученные результаты говорят о целесообразности применения подобных волокон взамен прямых, в результате чего объемное содержание фибры в составе СВФБ может быть уменьшено при обеспечении требуемых прочностных характеристик. На территории Российской Федерации наибольшее применение находит волновая фибра, которая, вследствие наличия отгибов по всей длине волокна, обладает хорошим сцеплением с бетоном и имеет большой потенциал в сфере получения СВФБ. При этом в зарубежных источниках отсутствуют результаты определения физико-механических характеристик СВФБ с данным типом фибры. В отечественной же литературе приводятся результаты экспериментальных исследований для бетонной матрицы с прочностью при сжатии 72–106 МПа [21, 22], которые нельзя отнести к сверхвысокопрочным бетонам. В работах [23, 24] приводятся результаты испытаний СВФБ с волновой фиброй, которые имеют противоречивый характер. В связи с этим возникает необходимость определения и сравнения механических свойств СВФБ с различными видами и объемным содержанием стальной фибры, доступной на территории нашей страны.

В рамках проведения исследования были поставлены следующие задачи: 1) определение влияния вида и объемного содержания стальной фибры на механические свойства СВФБ; 2) выбор альтернативного варианта фибрового армирования взамен прямой фибры, которая традиционно применяется за рубежом в составах СВФБ и производство которой на сегодняшний день в Российской Федерации не налажено вследствие отсутствия массового применения этого материала в строительстве.

Материалы и методы. В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. В качестве заполнителя использовался фракционированный кварцевый песок фракций 0,1–0,4 и 0,4–0,8 мм в соотношении 30:70, обеспечивающем максимальную плотность упаковки

частиц рыхлонасыпном состоянии. В качестве активной минеральной добавки применялся уплотненный микрокремнезем МКУ-85, соответствующий требованиям ГОСТ Р 58894-2020. Кварцевая мука с удельной поверхностью 429,6 м²/кг использовалась в качестве инертного наполнителя. Удобоукладываемость сталефибробетонных смесей регулировалась при помощи суперпластифицирующей добавки на основе эфиров поликарбоксилатов MasterGlenium 115. Основные свойства цемента и инертных компонентов представлены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Таблица 1

Основные свойства портландцемента

Свойство	Значение	
Нормальная густота, %	26,4	
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	53,6	
Истинная плотность, кг/м ³	3105	
Минералогический состав	C ₃ S, %	61,7
	C ₂ S, %	13,1
	C ₃ A, %	6,2
	C ₄ AF, %	15,4

Таблица 2

Физические свойства инертных компонентов

Компонент	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³
Кварцевый песок 0,1–0,4	1403	2640
Кварцевый песок 0,4–0,8	1524	2630
Кварцевая мука	–	2650
Микрокремнезем	–	2200

В работе было использовано пять видов стальной фибры: волновая диаметром 0,3 мм и длиной 15 и 22 мм, прямая длиной 13 мм и диаметром 0,2 и 0,3 мм и анкерная длиной и диаметром 30 и 0,5 мм, соответственно. Используемая в данной работе фибра произведена компанией ОАО «БМЗ», Беларусь. Прямая фибра с условным обозначением П(0,2) произведена компанией Briture CO., LTD, Китай. Основные параметры и внешний вид фибры представлены в таблице 3 и рисунке 1, соответственно.

Было испытано 16 составов сверхвысокопрочных фибробетонов, содержание стальной фибры в которых составляло 0, 1, 2 и 3 % по объему. Водоцементное соотношение, содержание кварцевой муки и микрокремнезема не изменялось и составляло 26,5, 20 и 20 % от массы цемента, соответственно. Суммарное содержание кварцевого песка во всех составах было принято равным 1055 кг. Содержание суперпластифицирующей добавки подбиралось таким образом,

чтобы обеспечить диаметр расплыва конуса Хегерманна в диапазоне 250–280 мм для составов с волновой и прямой фиброй и в диапазоне 170–200 мм для составов с анкерной фиброй. Путем проведения предварительных испытаний было установлено, что при диаметрах расплыва выше указанных снижается однородность материала вследствие седиментации стальной фибры, что

приводит к ухудшению механических характеристик СВФБ. Расход суперпластификатора составлял 2–3 % от массы цемента. Расход воды корректировался с учетом содержания воды в добавке таким образом, чтобы обеспечить постоянное водоцементное соотношение. Составы СВФБ с различным содержанием фибрового армирования без учета пластифицирующей добавки представлены в таблице 4.

Таблица 3

Свойства стальной фибры

Условное обозначение	Вид фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Соотношение l_f/d_f	Временное сопротивление разрыву, МПа
В(15)	Волновая	15	0,3	50	≥ 1800
В(22)	Волновая	22	0,3	73	≥ 1800
А	Анкерная	30	0,5	60	≥ 1150
П(0,3)	Прямая	13	0,3	43	≥ 1800
П(0,2)	Прямая	13	0,2	65	≥ 1800

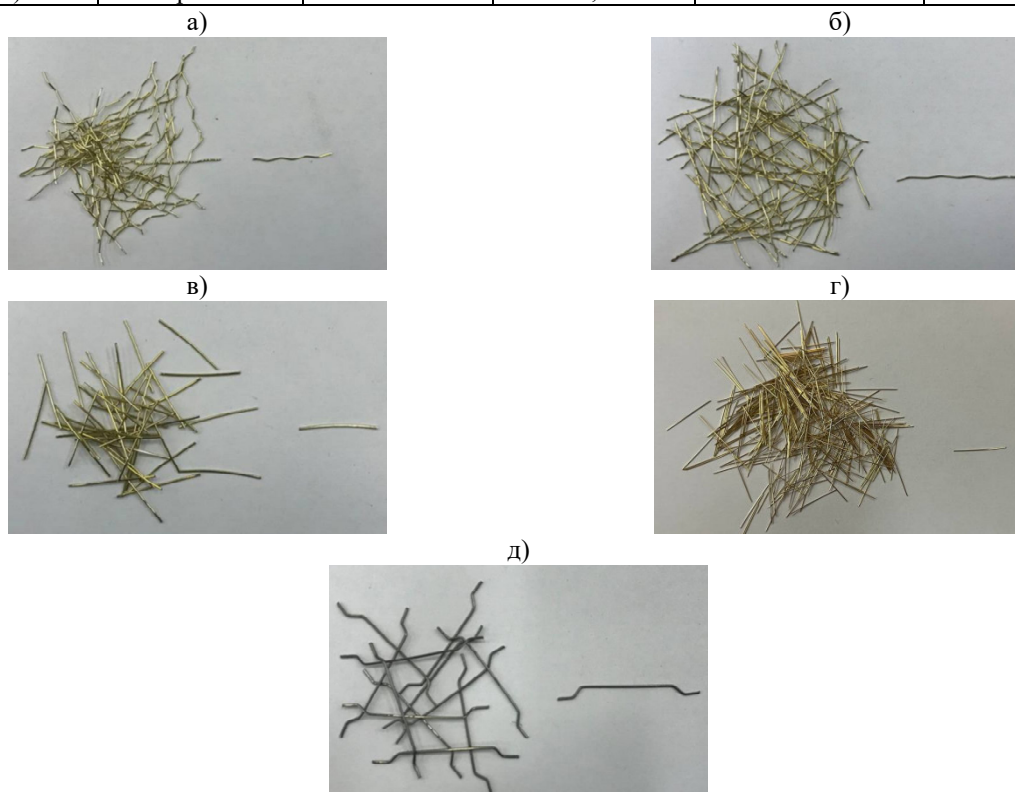


Рис. 1. Внешний вид стальной фибры: а) волновая фибра В(15); б) волновая фибра В(22); в) прямая фибра П(0,3); г) прямая фибра П(0,2); д) анкерная фибра А

Таблица 4

Составы сверхвысокопрочного фибробетона

Компонент	$V_f = 0 \%$	$V_f = 1 \%$	$V_f = 2 \%$	$V_f = 3 \%$
Цемент	796	783	769	756
Вода	211	207	204	200
Микрокремнезем	159	157	154	151
Кварцевая мука	159	157	154	151
Кварцевый песок 0,1–0,4	315	315	315	315
Кварцевый песок 0,4–0,8	740	740	740	740
Стальная фибра	0	78	156	234

Маркировка составов представлена в виде «X-Y», где X – вид стальной фибры согласно таблице 3, Y – объемное содержание стальной фибры в процентах от объема смеси.

Фибробетонные смеси приготавливались в автоматическом растворосмесителе в следующей последовательности: 1) перемешивание всех сухих компонентов в течение 1 минуты; 2) добавление воды и пластифицирующей добавки, перемешивание в течение 2 минут; 3) остановка на 1 минуту; 4) перемешивание смеси до однородного состояния в течение 3–8 минут; 5) добавление стальной фибры в течение 2 минут и последующее перемешивание в течение дополнительной 1 минуты. Суммарное время перемешивания составляло от 10 до 15 минут.

Для проведения испытаний из фибробетонной смеси изготавливались образцы-кубы размером 50×50×50 мм для испытания на сжатие и образцы-балочки размером 40×40×160 мм для испытания на изгиб. Малые размеры образцов-балочек были выбраны с целью повышения коэффициента ориентации фибры и снижения вариативности результатов испытаний, что позволяет более корректно оценить вклад формы и геометрических размеров фибры на ключевые свойства СВФБ. После формования образцы хранились в формах в нормальных температурно-влажностных условиях в течение двух суток, после чего подвергались тепловлажностной обработке в течение 48 часов при температуре 80 °С. После пропаривания и до момента испытания образцы хранились трое суток в помещении лаборатории.

Испытание на сжатие проводилось на гидравлическом прессе. Скорость нагружения образцов составляла 2 МПа/с. Предел прочности отдельного образца определялся по формуле:

$$R = \frac{F}{A}, [\text{МПа}] \quad (1)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения образца, мм².

Испытание образцов на изгиб осуществлялось на электромеханическом прессе. Скорость перемещения траверсы во время испытания составляла 0,4 мм/мин. Расстояние между опорами составляло 100 мм. Предел прочности на изгиб отдельного образца определялся по формуле:

$$R_{tb} = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2}, [\text{МПа}] \quad (2)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, мм; b , h – ширина и высота поперечного сечения образца, мм.

Одним из основных свойств фибробетонов является количество поглощенной в процессе разрушения энергии, которая оценивается при помощи энергии разрушения. Энергия разрушения отдельного образца определялась по формуле:

$$G_f = \frac{W}{b \cdot h}, [\text{Н/мм}] \quad (3)$$

где W – работа, затрачиваемая на деформирование образца и определяемая как площадь под диаграммой «нагрузка-прогиб», Н · мм.

Работа, затрачиваемая на деформирование образца, определялась путем интегрирования диаграммы «нагрузка прогиб» до значения прогиба, равного 3,5 мм.

Значение прочности при сжатии и изгибе, а также энергии разрушения серии образцов определялось как среднеарифметическое значение результатов трех испытаний.

Основная часть. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 5.

На графиках рисунка представлены зависимости прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания фибры различного вида.

Таблица 5

Результаты испытаний

№	Маркировка	R , МПа	R_{tb} , МПа	G_f , Н/мм
1	К	151,5	10,68	317
2	В(15)-1	161,1	15,74	6480
3	В(15)-2	169,5	25,09	15710
4	В(15)-3	183,4	35,75	19360
5	В(22)-1	166,4	25,49	14550
6	В(22)-2	178,3	38,84	23480
7	В(22)-3	193,2	46,84	29170
8	П(0,3)-1	158,3	13,73	8070
9	П(0,3)-1	165,5	18,27	10000
10	П(0,3)-1	165,3	29,47	14120
11	П(0,2)-1	160,6	20,19	13910
12	П(0,2)-2	168,8	29,69	17000
13	П(0,2)-3	175,7	38,26	19970
14	А-1	162,1	15,13	4870
15	А-2	168,3	24,89	10090
16	А-3	180,4	35,15	15560

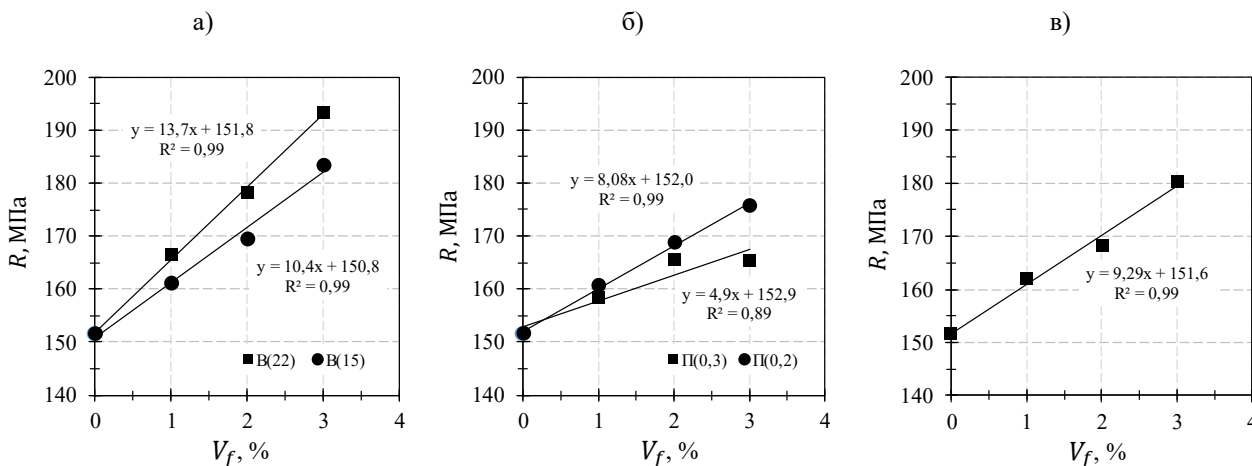


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания фибры: а) составы с волновой фиброй; б) составы с прямой фиброй; в) составы с анкерной фиброй

Увеличение объемного содержания стальной фибры в составе СВФБ, вне зависимости от ее вида и геометрических размеров, приводит к пропорциональному увеличению прочности при сжатии, что соответствует результатам других авторов [12, 15]. Механизм увеличения прочности основан на способности фибры сдерживать рост микротрещин, возникающих при нагружении фибробетона, что выражается в увеличении максимального сжимающего напряжения, которое способен выдержать композит до разрушения [25]. При увеличении содержания фибры с 0 до 3 % прочность при сжатии увеличилась с 151,5 МПа до 183,4 МПа для составов с фиброй В(15), до 193,2 МПа для составов с фиброй В(22), до 165,3 МПа для составов с фиброй П(0,3), до 175,7 МПа для составов с фиброй П(0,2) и до 180,4 МПа для составов с фиброй А. При увеличении длины волновой фибры с 15 до 22 мм, как видно из рисунка 1-а, наблюдается более высокий прирост прочности на всех уровнях армирования: при содержании фибры 1, 2 и 3 % прочность при сжатии выше на 5,3, 8,8 и 9,8 МПа, соответственно. Улучшение механических свойств при увеличении длины фибры связано с увеличением усилия, которое необходимо приложить для сдвига фибры в теле бетонной матрицы в процессе разрушения композита. Диаметр стальной фибры также оказывает влияние на прочность при сжатии. Как показано на рисунке 1-б, при уменьшении диаметра прямой фибры с 0,3 до 0,2 мм наблюдается более интенсивный рост прочности при увеличении объема дисперсного армирования. Это связано с тем, что при уменьшении диаметра фибры резко увеличивается количество волокон, приходящихся на единицу объема материала. Например, количество волокон с размером 13/0,2 мм при объемном содержании 1 % составляет $24,5 \cdot 10^6$ шт/м³, в то время как волокон с размером 13/0,3 мм $10,9 \cdot 10^6$ шт/м³. Для учета

всех факторов дисперсного армирования, оказывающих влияние на механические свойства фибробетона, широко используется фактор фибры, χ_f , который рассчитывается по формуле [26]:

$$\chi_f = V_f \cdot l_f / d_f, [\%] \quad (4)$$

где V_f – объемное содержание фибры, %; l_f , d_f – длина и диаметр отдельного волокна, мм.

На графиках рисунка 2 представлены зависимости изменения относительной прочности при сжатии СВФБ от фактора фибры, χ_f . Относительная прочность, $R_{отн}$, была рассчитана как отношение прочности фибробетона к прочности бетонной матрицы по формуле:

$$R_{отн} = \frac{R_f}{R_o}, [-] \quad (5)$$

где R_f – прочность состава с фиброй, МПа; R_o – прочность состава без фибры, МПа.

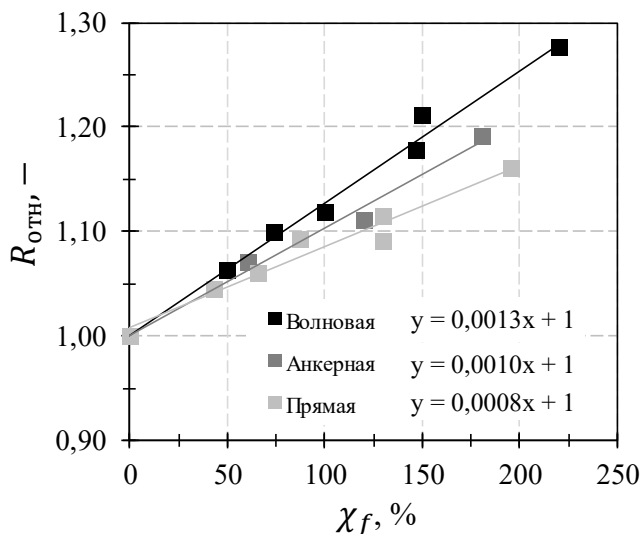


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии СВФБ от фактора фибры

Зависимость $R_{отн} = f(\chi_f)$ описывается линейным уравнением вида $y = a_1 \cdot x + 1$. Как

видно из рисунка 2, угол аппроксимирующих линий меняется в зависимости от вида фибры, что выражается в изменении коэффициента a_1 . Наибольшее значение коэффициента было получено для волновой фибры, наименьшее – для прямой. Угол наклона аппроксимирующих линий в данном случае зависит от прочности сцепления поверхности стальной фибры с бетонной матрицей. Эта величина зависит от прочности адгезионных связей, возникающих в контактной зоне, а также от механического зацепления при наличии отгибов у волокна. По данным из литературных источников, прочность сцепления волновой фибры с бетонной матрицей с прочностью при сжатии 140–160 МПа (аналогичной той, что используется в данной работе) находится в диапазоне 7,4–8,6 МПа, анкерной – 10,8–12,1, волновой – 14,6–16,8 МПа [27–29]. Прочность сцепления прямой фибры с бетоном является наименьшей, потому что она определяется в основном количеством химических связей в контактной зоне. Механическое зацепление реализуется только за

счет слегка деформированного конца волокна, образующегося в процессе резки проволоки [30], величиной которого можно пренебречь. Прочность сцепления анкерной и волновой фибры существенно выше, так как эти типы волокон имеют отгибы либо на концах фибры, либо по всей длине. Для выдергивания таких волокон из бетона необходимо не только разрушить химические связи, но и деформировать имеющиеся отгибы. Волновая фибра имеет большую прочность сцепления, в связи с большим количеством отгибов по длине волокна. Как видно из рисунка 2, значения коэффициента a_1 линейного уравнения соответствуют величинам прочности сцепления волокон, представленным в литературных источниках, и составляют 0,0013, 0,0010 и 0,0008 для волновой, анкерной и прямой фибры, соответственно.

На графиках рисунка 3 представлены зависимости относительной прочности при изгибе, $R_{tb,отн}$, от фактора фибры, χ_f .

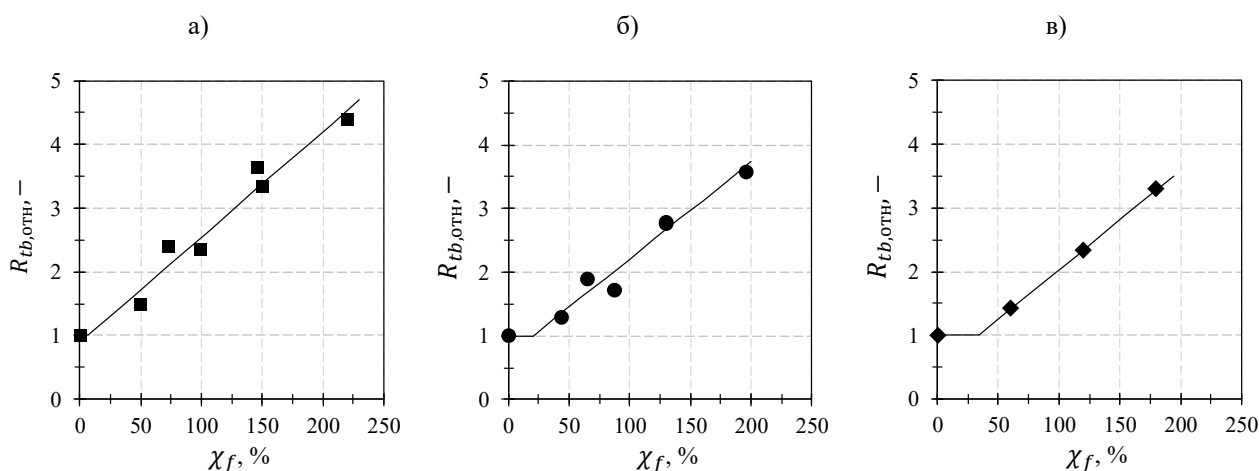


Рис. 3. Зависимость относительной прочности при изгибе СВФБ от фактора фибры: а) составы с волновой фиброй; б) составы с прямой фиброй; в) составы с анкерной фиброй

Максимальная относительная прочность при изгибе для составов с волновой фиброй В(15) и В(22) составляет 3,35 и 4,39, соответственно; для составов с прямой фиброй П(0,3) и П(0,2) – 2,76 и 3,58, соответственно и для составов с анкерной фиброй – 3,29. При увеличении фактора фибры наблюдается пропорциональное увеличение относительной прочности при изгибе и полученные зависимости имеют схожий вид с представленными на рисунке 2. Существенным отличием является наличие минимального значения фактора фибры, $\chi_{f,min}$, после которого фибра начинает оказывать влияние на прочность при изгибе. При значениях $\chi_f < \chi_{f,min}$ относительная прочность при изгибе равна единице, то есть прочность фибробетона равна прочности бетонной мат-

рицы. Подобное поведение фибробетона объясняется тем, что после появления первой трещины в бетонной матрице изгибающая нагрузка воспринимается группой фибр, пересекающих плоскость разрушения. Суммарное усилие, которое может быть воспринято фибробетонным образцом, зависит количества волокон в сечении и их длины заделки в бетонную матрицу, что учитывается фактором фибры, χ_f , прочностью сцепления фибры с бетоном, а также коэффициентом ориентации волокон в пространстве [31]. Если усилие, которое воспринимает группа фибр, меньше усилия, необходимого для разрушения бетонной матрицы, фибробетон переходит в стадию разрушения, что сопровождается выдергиванием фибр и снижением нагрузки, воспринимае-

мой материалом. В противном случае происходит увеличение прочности фибробетона относительно бетонной матрицы, что наблюдается при

$\chi_f > \chi_{f,min}$. Значения эмпирических коэффициентов линейного уравнения зависимости $R_{tb,отн} = f(\chi_f)$, а также $\chi_{f,min}$ для испытанных составов СВФБ представлены в таблице 6.

Таблица 6

Значения эмпирических коэффициентов зависимости $R_{отн} = f(\chi_f)$ и $\chi_{f,min}$

Вид фибры	$R_{tb,отн} = a_2 \cdot \chi_f + b$		$\chi_{f,min}, \%$
	a_2	b	
Волновая	0,017	0,88	7,1
Анкерная	0,016	0,47	33,9
Прямая	0,015	0,69	20,3

Значения коэффициента a_2 для составов с различными видами фибр имеют тот же порядок значений, что и величины прочности сцепления фибры с бетоном, представленными в работах [27-29]. Наибольшее значение коэффициента было получено для волновой фибры, наименьшее – для прямой, что также соответствует результатам определения прочности при сжатии, представленным на рисунке 2. Наименьшее значение $\chi_{f,min}$ было получено для составов с волновой фиброй, наибольшее – для фибробетонов с анкерной фиброй. Это может объясняться тем, что анкерная фибра изготовлена из низкоуглеродистой проволоки с низким пределом текучести, в результате чего при низких значениях χ_f растягивающее напряжения в волокнах приводят к их разрыву. Стоит отметить, что экспериментально полученные значения $\chi_{f,min}$ зависят от коэффициента ориентации фибры, при уменьшении которого будет происходить увеличение нижней границы фактора фибры. Коэффициент ориентации, в том числе, зависит от размера испытываемого образца и, как правило, принимает меньшие значения на образцах большего размера, что связано с уменьшением объема пристеночной зоны, в которой свободное вращение фибры в пространстве ограничено стенкой формы. В работе [32] приведены экспериментальные значения прочности при изгибе самоуплотняющихся составов СВФБ с прямой стальной фиброй при различных значениях χ_f . Испытания проводились на образцах размером $100 \times 100 \times 400$ мм. На графике рисунка 4 представлено сравнение значений $R_{tb,отн}$, полученных в данной работе для составов с прямой фиброй и в статье [32]. Как видно из рисунка 4, при увеличении сечения контрольных образцов с 40×40 мм до 100×100 мм значение $\chi_{f,min}$ сместилось с 20,3 до 32,5 %. При этом угол наклона аппроксимирующей линии к оси абсцисс практически не изменился.

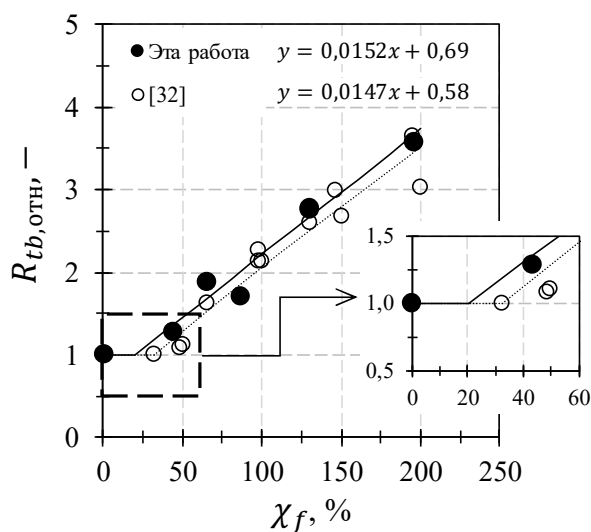


Рис. 4. Сравнение экспериментально полученных значений $R_{tb,отн}$ для составов с прямой фиброй с данными работы [32]

Одним из основных преимуществ фибробетонов является их способность поглощать большое количество энергии в процессе разрушения, вследствие того, что энергия тратится не только на разрушение бетонной матрицы, но и на выдергивание фибр. На рисунке 5-а представлены зависимости относительной энергии разрушения сверхвысокопрочных сталефибробетонов, $G_{F,отн}$, от фактора фибры. Максимальная относительная энергия разрушения для составов с волновой фиброй В(15) и В(22) составляет 61,1 и 92,0, соответственно; для составов с прямой фиброй П(0,3) и П(0,2) – 44,5 и 63,0, соответственно, и для составов с анкерной фиброй – 49,1. Наибольшие значения энергии разрушения были получены для составов с волновой фиброй, наименьшие – с анкерной. Более низкие значения G_F составов с анкерной фиброй обусловлены, с одной стороны, более низкой прочностью волокон при растяжении, что приводит к их частичному разрыву при выдергивании, а с другой – concentra-

цией напряжений в бетонной матрице вблизи анкеров, приводящих к разрушению бетона и уменьшению эффективной площади контакта с поверхностью волокна [26]. Энергия разрушения также линейно зависит от фактора фибры. При этом отсутствует граничное значение $\chi_{f,min}$, как в случае прочности при изгибе, что говорит о включении в работу фибрового армирования вне зависимости от его вида и объемного содержания. При равном значении прочности при изгибе составы с прямой фиброй имеют немного более высокую энергию разрушения по сравнению с волновой или анкерной фиброй, что опять же мо-

жет быть связано с отсутствием локальных разрушений бетонной матрицы при выдергивании прямых волокон. Однако для достижения равной прочности при изгибе объемное содержание прямой фибры должно быть выше по сравнению с волновой или анкерной, что приведет к удорожанию состава. Была установлена общая тенденция к увеличению энергии разрушения при увеличении прочности СВФБ при изгибе, которая описывается линейным уравнением с коэффициентом детерминации 0,89 (рисунок 5-б). Полученная зависимость может использоваться для ориентировочной оценки энергии разрушения по результатам испытаний на изгиб.

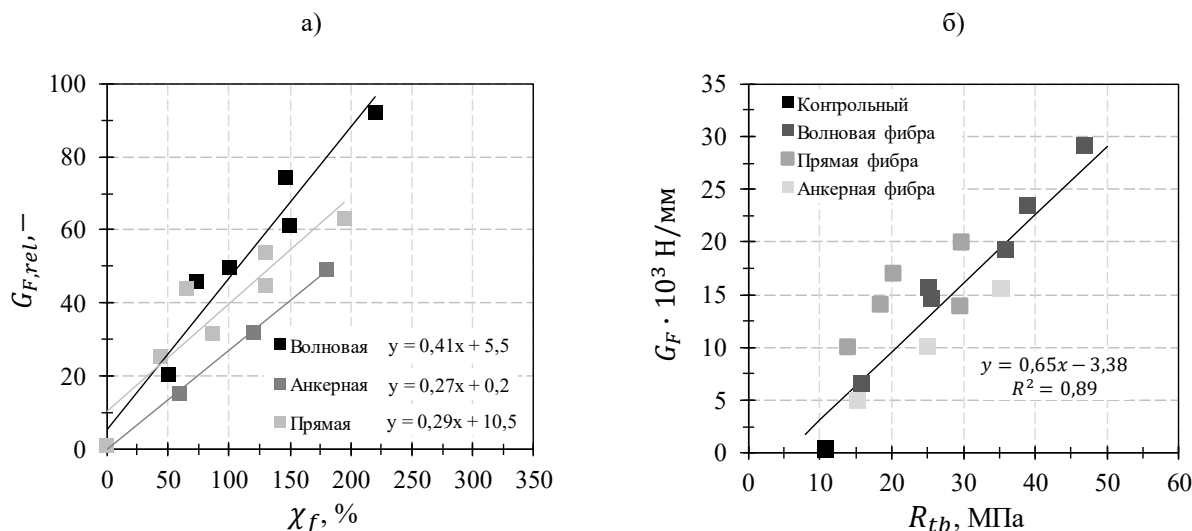


Рис. 5. а) Зависимость относительной энергии разрушения СВФБ от фактора фибры; б) зависимость энергии разрушения СВФБ от прочности при изгибе

Одной из задач данной работы было определение оптимального варианта фибрового армирования СВФБ. Для этого было выбрано 5 составов с различными видами стальной фибры, содержание которой составляет 2 %, что соответствует наиболее часто встречаемому содержанию фибры в составах сверхвысокопрочных фибробетонов. Для оценки эффективности того или иного вида дисперсного армирования был рассчитан обобщенный критерий качества по формуле [33]:

$$F = \sqrt[4]{k_R \cdot k_{R_{tb}} \cdot k_{G_F} \cdot k_V}, [-] \quad (6)$$

где k_R , $k_{R_{tb}}$, k_{G_F} и k_V – частные критерии качества, характеризующие изменение прочности при сжатии, изгибе, энергии разрушения и скорости седиментации волокна относительно базового состава. В качестве базового состава была выбрана смесь П(0,2)-2, содержащая прямую стальную фибру диаметром 0,2 мм, применение которой находит широкое применение в мировой практике. Критерий k_V имеет важное значение для самоуплотняющихся фибробетонных смесей с низкими значениями предельного напряжения

сдвига и пластической вязкости. Вследствие разности плотностей бетонной матрицы и фибры последняя имеет тенденцию к седиментации, при интенсивном протекании которой возрастает риск ухудшения механических свойств СВФБ. Согласно закону Стокса, при прочих равных условиях скорость оседания сферической частицы прямо пропорциональна квадрату ее диаметра. Для оценки склонности стальной фибры к седиментации в самоуплотняющихся бетонных смесях был рассчитан диаметр сферы эквивалентного фибре объема по формуле:

$$d_{f,eq} = \sqrt[3]{1,5 \cdot l_f \cdot d_f^2} \text{ [мм]} \quad (7)$$

При увеличении эквивалентного диаметра увеличится начальная скорость оседания волокна, что повышает риск расслоения. Формулы расчета частных критериев представлены в таблице 7, результаты расчета частных и обобщенного критерия – в таблице 8.

По результатам расчетов было установлено, что при условии равной значимости каждого из четырех выбранных критериев, наиболее оптимальным альтернативным вариантом фибрового

армирования является использование волновой фибры 22/0,3 мм, значение обобщенного критерия для которого равняется 1,05. Наихудшим альтернативным вариантом является использование

анкерной фибры 30/0,5 мм как с точки зрения механических свойств СВФБ, так и седиментационной устойчивости фибры в самоуплотняющихся смесях.

Таблица 7

Формулы для расчета частных критериев качества

Показатель	Формула	Примечание
Критерий прочности при сжатии	$k_R = \frac{R_i}{R_b}$ (8)	R_i – прочность при сжатии i-го состава, МПа R_b – прочность при сжатии базового состава, МПа
Критерий прочности при изгибе	$k_{R_{tb}} = \frac{R_{tb,i}}{R_{tb,b}}$ (9)	$R_{tb,i}$ – прочность при изгибе i-го состава, МПа $R_{tb,b}$ – прочность при изгибе базового состава, МПа
Критерий энергии разрушения	$k_{G_F} = \frac{G_{F,i}}{G_{F,b}}$ (10)	$G_{F,i}$ – энергия разрушения i-го состава, МПа $G_{F,b}$ – энергия разрушения базового состава, МПа
Критерий седиментационной устойчивости	$k_V = \frac{d_{f,eq,b}}{d_{f,eq,i}}$ (11)	$d_{f,eq,i}$ – эквивалентный диаметр фибры i-го состава, МПа $d_{f,eq,b}$ – эквивалентный диаметр фибры базового состава, МПа

Таблица 8

Результаты расчета частных и обобщенного критерия качества

Состав	k_R	$k_{R_{tb}}$	k_{G_F}	k_V	F
П(0,2)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
П(0,3)	0,98	0,62	0,59	0,76	0,72
В(15)	1,00	0,85	0,92	0,73	0,87
В(22)	1,06	1,31	1,38	0,64	1,05
А	1,00	0,84	0,59	0,41	0,67

Выводы. В работе представлены результаты испытаний сверхвысокопрочных сталефибробетонов, содержащих волновую, анкерную и прямую стальную фибру различных геометрических размеров и объемного содержания. По результатам проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных могут быть сделаны следующие выводы:

1. Прочность при сжатии СВФБ линейно зависит от комплексного параметра, факторы фибры (χ_f), учитывающего объемное содержание, длину и диаметр волокон в составе материала. Угол наклона графиков зависимостей $R = f(\chi_f)$ к оси абсцисс зависит от вида фибры и принимает наибольшее значение для волновой фибры, наименьшее – для прямой. В зависимости от вида фибры и значения величины χ_f прочность при сжатии относительно бетонной матрицы может быть увеличена на 28%.

2. Прочность при изгибе СВФБ также линейно зависит от фактора фибры. При равном значении фактора фибры наибольшей прочностью обладают составы с волновой фиброй. Было обнаружено наличие минимального значения фактора фибры, $\chi_{f,min}$, после достижения которого добавление стальной фибры приводит к увеличению прочности фибробетона при изгибе относительно прочности бетонной матрицы. Сравнивая собственные экспериментальные значения с данными из литературных источников, было

установлено влияние размера контрольных образцов на величину $\chi_{f,min}$. При этом общий вид зависимости $R_{tb} = f(\chi_f)$ не изменяется. В зависимости от вида фибры и значения величины χ_f прочность при изгибе относительно бетонной матрицы может быть увеличена на 439 %.

3. Наиболее значительное влияние стальная фибра оказывает на энергию разрушения, G_F , увеличение которой происходит при любых значениях χ_f , отличных от нуля. Была установлена линейная зависимость между энергией разрушения и прочностью при изгибе. При равных значениях прочности при изгибе составы с прямой фиброй имеют немного более высокую энергию разрушения. В зависимости от вида фибры и значения величины χ_f прочность энергия разрушения относительно бетонной матрицы может быть увеличена на 9200 %.

4. При помощи обобщенного критерия качества, учитывающего механические характеристики СВФБ и седиментационную устойчивость стальной фибры в самоуплотняющихся смесях, было установлено, что наилучшей альтернативой прямой стальной фибре с размерами 13/0,2 мм является волновая фибра 22/0,2 мм.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

(грант на поддержку научных исследований аспирантов, проект № 9-480/130).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bajaber M.A., Hakeem I.Y. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10. Pp. 1058–1074. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051
2. Azmee N.M., Shafiq N. Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00197
3. Yang J., Chen B., Su J., Xu G., Zhang D., Zhou J. Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022. Vol. 9. Pp. 363–387. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.05.001
4. Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) under Direct Tensile Loading // *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 48. Pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
5. Wille K., Naaman A., El-Tawil S. Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // *ACI Concrete International*. 2011. Vol. 33. Pp. 35–41.
6. Yoo D.Y., Lee J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites // *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. Pp. 742–753. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.033
7. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. Review of Ultra-High Performance Concrete and Its Application in Bridge Engineering // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844
8. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., Guo P., Lyu Z., Abu-Obeidah A., Nassif H., Wang H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) // *Composites Part B*. 2021. Vol. 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220
9. Mash J.A., Harries K.A., Rogers C. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems // *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 207. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107975
10. Марченко М.С., Чилин И.А., Селютин Н.М. Опыт применения сверхвысокопрочного сталефибробетона в элементах усиления железобетонных конструкций // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021. №30. С. 41–50. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(301-61-50)
11. Rossi P., Arca A., Parant E., Fakhri P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Pp. 27–33. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.043
12. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124104
13. Jiao C., Ta J., Niu Y., Meng S., Chen X.F., He S., Ma R. Analysis of the flexural properties of ultra-high-performance concrete consisting of hybrid straight steel fibers // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01153
14. Yoo D.Y., Kim S., Park G.J., Park J.J., Kim S.W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites // *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. Pp. 375–388. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.069
15. Shao R., Wu C., Li J., Liu Z. Investigation on the mechanical characteristics of multiscale mono/hybrid steel fibre-reinforced dry UHPC // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104681
16. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130349
17. Soloviev V., Matiushin E. The Effects of Corrugated Steel Fiber on the Properties of Ultra-High Performance Concrete of Different Strength Levels // *Buildings*. 2023. Vol. 13. DOI: 10.3390/buildings13102591
18. Qiu M., Shao X., Zhu Y., Hessein H.H., Li F., Li X. Effect of Aspect Ratios of Hooked End and Straight Steel Fibers on the Tensile Strength of UHP-FRC // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022. Vol. 34. Iss. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004283
19. Pyo S., Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 56. Pp. 15–24. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.002
20. Abellán-García J. Tensile behavior of recycled-glass-UHPC under direct tensile loading // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01308
21. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Горбунов И.А. Влияние характеристик фибры на кубиковую и призмную прочность

сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2013. №6. С. 6–9.

22. Krasnovsy R., Kapustin D., Korotkikh D., Efshov L. Complete diagrams of strain under axial tension of steel-fiber reinforced concrete with different fiber types and content // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012013

23. Тамов М.М., Салиб М.И.Ф., Абуизеих Ю.К.И., Софьяников О.Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. №4. С. 25–39. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39

24. Чилин И.А. Влияние технологических факторов на свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. №4. С. 135–157. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-135-147

25. Li V.C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites // Cement and Concrete Composites. 1992. Vol. 14. Iss. 2. Pp. 131–141. DOI: 10.1016/0958-9465(92)90006-H

26. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents // Materials and Structures. 2011. Vol. 44. Pp. 583–598. DOI: 10.1617/s11527-010-9650-4

27. Yoo D.Y., Park J.J., Kim S.W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type // Composite Structures. 2017. Vol. 174.

Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.064

28. Kang S.H., Ahn T.H., Kim D.J. Effect of grain size on the mechanical properties and crack formation of HPFRCC // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Iss. 5. Pp. 710–720. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.02.011

29. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. Pp. 688–702. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274

30. Wille K., Naaman A.E. Effect of Ultra-High-Performance Concrete on Pullout Behavior of High-Strength Brass-Coated Straight Steel Fibers // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. Pp. 451–462.

31. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. A meso-mechanical model to simulate the tensile behaviour of ultra-high performance fibre-reinforced cementitious composites // Composite Structures. 2019. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110911

32. Park J.J., Yoo D.Y., Park G.J., Kim S.W. Feasibility of Reducing the Fiber Content in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete under Flexure // Materials. 2017. Vol. 10. DOI: 10.3390/ma10020118

33. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Технико-экономическая эффективность применения наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2011. №13. С. 536–543. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.536-543

Информация об авторах

Соловьев Вадим Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Матюшин Евгений Валерьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения. E-mail: matyushinev@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 13.05.2024 г.

© Соловьев В.Г., Матюшин Е.В., 2024

Soloviev V.G., *Matiushin E.V.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

**E-mail: matyushinev@mgsu.ru*

MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF STEEL FIBER

Abstract. The article examines the influence of steel fiber type and volumetric content on the mechanical properties of UHPFRC. Five fiber types were used: corrugated 15/0.3 and 22/0.3 mm, straight 13/0.3 and 13/0.2 mm, and hooked-end 30/0.5 mm. The fiber volume content ranged from 0 to 3%. During the experimental studies, compressive strength, flexural strength, as well as the flexural fracture energy were determined. It has been discovered that an increase in the volumetric content of steel fiber results in an enhancement

of all the properties under consideration, irrespective of the type of fiber. The fiber has the biggest effect on the bending fracture energy and the least on the compressive strength. Linear relationships between the mechanical characteristics of UHPFRC and the fiber factor were established, which reflects the volumetric content, length, and diameter of an individual fiber. The slope angle of the approximating lines of the “compressive strength-fiber factor” and “flexural strength-fiber factor” relationships takes on different values depending on the type of fiber used. The highest slope angle is found for corrugated fiber. It was discovered that there is a threshold value of the fiber factor, upon reaching which the steel fiber leads to an increase in the flexural strength of the UHPFRC. According to a generalized quality criterion it has been determined that corrugated fiber with dimensions of 22/0.3 mm is the optimal substitute for straight fiber 13/0.2 mm, which is widely utilized for the production of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete.

Keywords: Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, UHPFRC, steel fiber, corrugated fiber, straight fiber, hooked-end fiber, mechanical properties

REFERENCES

1. Bajaber M.A., Hakeem I.Y. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10. Pp. 1058–1074. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051
2. Azmee N.M., Shafiq N. Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol.8. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00197
3. Yang J., Chen B., Su J., Xu G., Zhang D., Zhou J. Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022. Vol. 9. Pp. 363–387. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.05.001
4. Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) under Direct Tensile Loading. *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 48. Pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
5. Wille K., Naaman A., El-Tawil S. Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Concrete International*. 2011. Vol. 33. Pp. 35–41.
6. Yoo D.Y., Lee J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. Pp. 742–753. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.033
7. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. Review of Ultra-High Performance Concrete and Its Application in Bridge Engineering. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.
8. Du J., Meng W., Khayat K. H., Bao Y., Guo P., Lyu Z., Abu-Obeidah A., Nassif H., Wang H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B*. 2021. Vol. 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220
9. Mash J.A., Harries K.A, Rogers C. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 207. DOI:10.1016/j.jcsr.2023.107975
10. Marchenko M., Chilin I., Selyutin N. Experience in using ultra high performance fiber reinforced concrete elements [Opyt primeneniya sverhvysokoprochnogo stalefibrobetona v elementah usileniya zhelezobetonnyh konstrukcij]. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021. No. 30. Pp. 41–50. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(301-61-50 (rus)
11. Rossi P., Arca A., Parant E., Fakhri P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Pp. 27–33. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.043
12. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124104
13. Jiao C., Ta J., Niu Y., Meng S., Chen X.F., He S., Ma R. Analysis of the flexural properties of ultra-high-performance concrete consisting of hybrid straight steel fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01153
14. Yoo D.Y., Kim S., Park G.J., Park J.J., Kim S.W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. Pp. 375–388. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.069
15. Shao R., Wu C., Li J., Liu Z. Investigation on the mechanical characteristics of multiscale mono/hybrid steel fibre-reinforced dry UHPC. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104681
16. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. 15. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130349
17. Soloviev V., Matiushin E. The Effects of Corrugated Steel Fiber on the Properties of Ultra-High Performance Concrete of Different Strength

- Levels. Buildings. 2023. Vol. 13. DOI: 10.3390/buildings13102591
18. Qiu M., Shao X., Zhu Y., Hessein H.H., Li F., Li X. Effect of Aspect Ratios of Hooked End and Straight Steel Fibers on the Tensile Strength of UHP-FRC. Journal of Materials in Civil Engineering. 2022. Vol. 34. Iss. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004283
19. Pyo S., Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Strain rate dependent properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension. Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 56. Pp. 15–24. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.002
20. Abellán-García J. Tensile behavior of recycled-glass-UHPC under direct tensile loading. Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01308
21. Dorf V.A., Krasnovsky R.O., Kapustin D.E., Gorbunov I.A. Study of the characteristics of fibers on the cubic and prismatic strength of steel fiber reinforced concrete with a cement-sand matrix [Vliyaniye harakteristik fibry na kubikovuyu i prizmennuyu prochnost' stalefibrobetona s cementno-peschanoy matricej]. Concrete and Reinforced Concrete. 2013. Vol. 6. Pp. 6–9. (rus)
22. Krasnovsy R., Kapustin D., Korotkikh D., Efishov L. Complete diagrams of strain under axial tension of steel-fiber reinforced concrete with different fiber types and content. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012013
23. Tamov M.M., Salib M.I.F., Abuzeih Yu.K.I., Sofyanikov O.D. mix design and study of strength properties of self-compacting ultra high-performance fiber-reinforced concrete [Podbor sostavov i issledovanie prochnostnyh harakteristik samouplotnyayushchegosya sverhvysokoprochnogo stalefibrobetona]. News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022. No. 4. Pp. 25–39. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39 (rus)
24. Chilin I. Influence of technological factors on the properties of ultra-high-performance fiber reinforced concrete [Vliyaniye tekhnologicheskikh faktorov na svoystva sverhvysokoprochnogo stalefibrobetona]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2020. No. 27. Pp. 135–147.
- DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-135-147 (rus)
25. Li V.C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites. Cement and Concrete Composites. 1992. Vol. 14. Iss. 2. Pp. 131–141. DOI: 10.1016/0958-9465(92)90006-H
26. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. Materials and Structures. 2011. Vol. 44. Pp. 583–598. DOI: 10.1617/s11527-010-9650-4
27. Yoo D.Y., Park J.J., Kim S.W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type. Composite Structures. 2017. Vol. 174. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.064
28. Kang S.H., Ahn T.H., Kim D.J. Effect of grain size on the mechanical properties and crack formation of HPFRCC. Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Iss. 5. Pp. 710–720. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.02.011
29. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. Pp. 688–702. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274
30. Wille K., Naaman A.E. Effect of Ultra-High-Performance Concrete on Pullout Behavior of High-Strength Brass-Coated Straight Steel Fibers. ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. Pp. 451–462.
31. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. A meso-mechanical model to simulate the tensile behaviour of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites. Composite Structures. 2019. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110911
32. Park J.J., Yoo D.Y., Park G.J., Kim S.W. Feasibility of Reducing the Fiber Content in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete under Flexure. Materials. 2017. Vol. 10. DOI: 10.3390/ma10020118
33. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Technical and economic efficiency of using nanomodified filler for asphalt concrete [Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya nanomodificirovannogo napolnitelya dlya asfal'tobetona]. Vestnik MGSU. 2011. No.13. Pp. 536–543. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.536-543 (rus)

Information about the authors

Soloviev, Vadim G. PhD, Assistant professor. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Matiushin, Evgenii V. Postgraduate student. E-mail: matyushinev@mgsu.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Received 13.05.2024

Для цитирования:

Соловьев В.Г., Матюшин Е.В. Механические свойства сверхвысокопрочного фибробетона с различными видами стальной фибры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 26–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39

For citation:

Soloviev V.G., Matiushin E.V. Mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with different types of steel fiber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 26–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39