

Известия вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 25–39.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (4): 25–39.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.327: 666.9716

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39

ПОДБОР СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

**Мурат Мухамедович Тамов, Мина Ибрагим Фахми Салиб,
Юсеф К.И. Абузеих, Олег Дмитриевич Софьяников**

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
Краснодар, Россия

Аннотация. В статье представлен опыт получения составов самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона (англ. ultra high-performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC или UHPC). Подбор составов бетона осуществляли в три стадии. В качестве критериев отбора были приняты удобоукладываемость смеси, прочность бетона на сжатие и на растяжение при изгибе, установленные стандартными испытаниями. Представлен простой в реализации способ испытания образцов сталефибробетона для определения остаточного сопротивления растяжению. Для дисперсного армирования бетона применяли прямую и волновую фибру. По предложенной схеме были получены составы, обладающие высокой подвижностью с прочностью затвердевшего бетона на сжатие и на растяжение при изгибе свыше 150 и 14 МПа соответственно. Дана оценка влияния концентрации прямой и волновой фибры на прочность бетона.

Ключевые слова: самоуплотняющаяся бетонная смесь, сверхвысокопрочный сталефибробетон, прямая фибра, волновая фибра, остаточная прочность на растяжение

Благодарности: инновационный проект выполнен при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках Конкурса научно-инновационных проектов, ориентированных на коммерциализацию № НИП-20.1/27.

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

Original article

MIX DESIGN AND STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF SELF-COMPACTING ULTRA HIGH-PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE

Murat M. Tamov, Mina I.F. Salib, Yousef Q.Y. Abuzeih, Oleg D. Sofianikov
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract. Paper presents authors' experience in producing of ultra high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC or UHPC). Design of mix was fulfilled in three stages.

Workability of the mix along with flexural tensile and compressive strength of concrete were adopted as selection criteria. These parameters were determined via standard tests. Easy to implement method of test for residual tensile strength of fiber-reinforced concrete is presented. Straight and wavy fibers were used as dispersed reinforcement of concrete. Using the suggested procedure several mixes were obtained with high flowability along with compressive and flexural tensile strength of hardened concrete higher than 150 and 14 MPa respectively. The effect of volume fraction of straight and wavy fibers on the strength of concrete is evaluated.

Keywords: self-sealing concrete mix, ultra high-performance fiber-reinforced concrete, straight fiber, wavy fiber, residual tensile strength

Acknowledgments: The innovation project was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the Commercializable scientific and innovation projects competition № NIP-20.01/27.

For citation: Tamov M.M., Salib M.I.F., Abuizeh Y.Q.Y., Sofianikov O.D. Mix design and study of strength properties of self-compacting ultra high-performance fiber-reinforced concrete. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (4): 25–39. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39.

1. Введение. Устойчивое развитие инженерной инфраструктуры требует проведения исследований, направленных на улучшение эксплуатационных свойств применяемых в строительстве материалов. Для бетона – самого распространенного в строительной индустрии материала – важнейшими характеристиками являются прочность и долговечность. Сверхвысокопрочные бетоны (СВПБ, англ. ultra high-performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC или УНРС) были впервые получены в середине 1990-х гг. [1, 2] и с тех пор стали объектом пристального внимания ученых и инженеров ввиду присущих им исключительных качеств, таких как высокая прочность и выносливость, долговечность, морозостойкость, способность поглощения энергии [3, 4]. Сверхвысокопрочными называют бетоны с прочностью на сжатие свыше 150 МПа и остаточной прочностью на растяжение свыше 5 МПа [5, 6]. В отечественной нормативной документации отсутствует понятие «сверхвысокопрочный» бетон. При этом в ГОСТ 31914–2012 указано, что тяжелые и мелкозернистые бетоны классом по прочности В60 и более называются высокопрочными.

Смесь СВПБ, как правило, включает стальную фибру, мелкий кварцевый песок и суперпластификатор, благодаря которому достигается низкое водоцементное отношение (В/Ц) [7]. А. Кери и др. [5] испытали около 400 образцов, изготовленных из 22 составов с разным содержанием фибры и мелкого заполнителя, для оценки их влияния на модуль упругости, сопротивление бетона сжатию и растяжению. Результаты исследования указывают, что высокая прочность бетона достигается оптимальным сочетанием цементной пасты и указанных компонентов, при котором проявляется синергетический эффект. Е. Серелис и др. [8] изучали влияние водоцементного отношения на сопротивление СВПБ сжатию при различном содержании микрокремнезема, кварцевого порошка и стеклянного порошка. Наибольшую прочность при сжатии (164 МПа) продемонстрировал состав, включавший стеклянный порошок и песок в отношении около 0,4:1 в отсутствие кварцевого порошка.

При изучении влияния содержания золы-уноса на набор прочности СВПБ при нормальных условиях твердения и при нагреве установлено, что введение в состав золы-уноса с целью повышения прочности СВПБ при сжатии требует

раннего прогрева с рекомендуемыми длительностью и температурой, равными 2 сут и 90 °С соответственно [9]. Исследование А. Мишиной и др. [10] посвящено физико-техническим свойствам сверхвысокопрочного бетона в разном возрасте. В качестве армирующей добавки применялась стальная волновая фибра в количестве от 10 до 28 % от массы цемента. Прирост прочности при сжатии с увеличением количества фибры оказался незначительным и на всем диапазоне ее концентрации составил около 1,5 %. При этом существенно выше (до 25 %) возросла прочность при растяжении. Расплав конуса смеси с оптимизированным составом составил 75 см при $V/C = 0,21$.

В качестве эффективной пуццолановой добавки для получения СВПБ чаще всего применяется микрокремнезем. Он содержит аморфные соединения SiO_2 , снижающие количество $Ca(OH)_2$ за счет его связывания в низкоосновные гидросиликаты кальция [11]. Способствовать протеканию этой реакции можно тепловой обработкой СВПБ. В опытах [12] твердение при повышенной температуре привело к увеличению ранней прочности СВПБ на 89 %, в то время как в возрасте 28 сут прочность прогретых образцов оказалась на 17 % выше эталонных. Похожие результаты в своих исследованиях получили в [13]: прочность СВПБ при сжатии в возрасте 28 сут после тепловой и тепловлажностной обработки превысила соответственно на 20 и 25 % прочность при твердении в воде.

С точки зрения практического применения СВПБ представляют интерес сведения об изменении его свойств в процессе твердения. В исследовании [14] прочность на сжатие СВПБ определяли для образцов, твердевших в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке. Для последних набор прочности практически приостановился спустя 48 ч. В свою очередь, образцы бетона, не подвергавшиеся пропариванию, продолжали набирать прочность в течение 8 недель. А. Мишина и др. [10] провели экспериментальные исследования ползучести СВПБ в возрасте 7, 14, 28 и 90 сут. Авторами получена нелинейная зависимость меры ползучести от возраста бетона. Н. Карпенко и др. [15] рассмотрены физико-механические и реологические свойства СВПБ. Длительными испытаниями образцов на сжатие показано, что при любом возрасте нагружения деформации ползучести СВПБ с фибровым армированием значительно ниже, чем без него. В статье [16] представлены результаты испытаний на сжатие и растяжение самоуплотняющегося СВПБ (дозировка фибры 0–210 kg/m^3) в возрасте 3, 7 и 28 сут. Лучшие показатели по подвижности смесей и прочности бетона достигнуты при дозировке фибры 150–180 kg/m^3 .

Включение в состав бетона фибры снижает хрупкость бетона, повышает прочность при растяжении, способность к рассеиванию энергии [17]. Армирующий эффект фибры обеспечивается ее сцеплением с окружающим бетоном и, очевидно, зависит от формы волокон [18]. В работе [19] оценивали подвижность и механические свойства СВПБ с тремя видами стальной фибры: анкерной длиной 35 мм и прямой длиной 6 и 13 мм. Указанные виды фибры использовались в смесях как по отдельности, так и в сочетании друг с другом («гибридное» армирование). Объемная доля фибры во всех составах составляла 2 %. Смеси с гибридным армированием продемонстрировали лучшую удобоукладываемость и более высокую прочность, чем составы с одним видом фибры. Прямую, анкерную и скрученную фибру использова-

ли в своих опытных составах К. Вилле и др. [20]. Применение анкерной и скрученной фибры повышает прочность (до 13 МПа) и деформативность (до 0,6 %) при растяжении.

Из обзора литературных источников можно сделать вывод об отсутствии универсального подхода к подбору составов СВПБ. В большинстве случаев для получения СВПБ с заданными характеристиками исследователи полагаются на существующую практику с последующей оптимизацией составов.

Целью настоящего исследования являлась отработка методики получения и оптимизации составов СВПБ с разными типами фибры. Процедура подбора составов СВПБ построена на последовательном их «наращивании»: новый компонент на текущей стадии добавляли к составу, продемонстрировавшему лучшие показатели на предшествующей стадии. Для опытных составов СВПБ применяли компоненты, доступные в Краснодарском крае.

2. Материалы и методы исследования.

2.1. *Компоненты бетонной смеси.* Следующие компоненты были использованы для составов СВПБ:

- портландцемент ПЦ 600-Д0 (ОАО «НОВОРОСЦЕМЕНТ»);
- микрокремнезем МК-85 (МК);
- суперпластификатор (СП) ViscoCrete 5 New (Sika);
- два типа кварцевого песка с $M_k = 2,56$ (КП) и $M_k = 0,79$ (МП);
- прямая (ПФ) и волновая (ВФ) латунированная фибра диаметром 0,3 мм и длиной 15 мм.

2.2. *План эксперимента и методика испытаний.* Получение состава СВПБ с желаемыми характеристиками осуществляли в три стадии (рис. 1). На первой стадии исследовали составы, содержавшие только цемент и крупный песок. Варьировали их соотношение, В/Ц при этом сохраняли постоянным. Вторая стадия включала испытания составов с различным содержанием крупного и мелкого песка, микрокремнезема и воды. На третьей – финальной – стадии в состав в разной объемной доле V_f в смеси вводили прямую и волновую фибры. Основным принцип принятого подхода заключался в том, что для последующей стадии выбирали только один состав из текущей стадии. Критерием выбора служили удобоукладываемость смеси и прочность при сжатии и растяжении при изгибе изготовленного из нее бетона.

Смеси изготавливали в следующей последовательности. Песок, цемент и микрокремнезем перемешивали в течение 5 мин. Затем в течение 5 мин при продолжающемся перемешивании медленно добавляли в воду с супер-

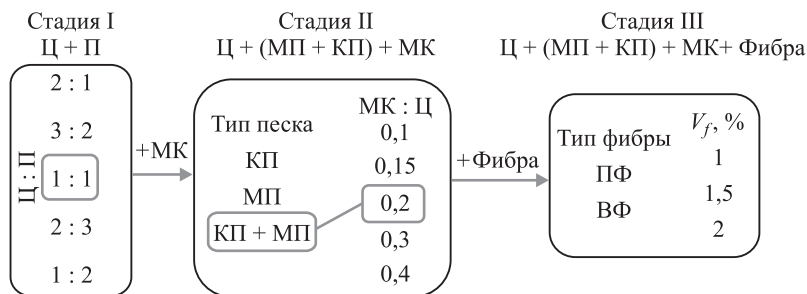


Рис. 1. Принятая схема подбора состава СВПБ

Fig. 1. Flowchart of UHPC mix design

пластификатором. Далее в смесь вводили стальную фибру, после чего перемешивание продолжали до получения однородной консистенции примерно 10 мин.

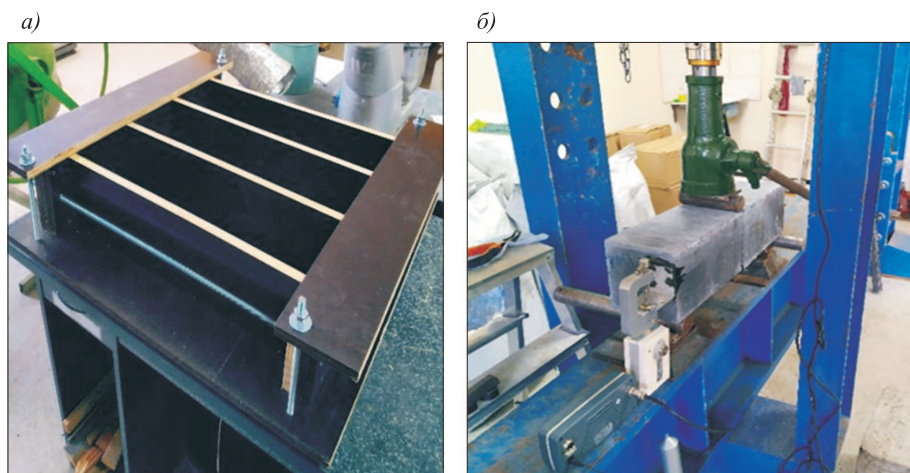
Удобоукладываемость бетонной смеси оценивали по расплыву конуса по ГОСТ 10181–2014 и мини-конуса по ГОСТ 310.4–81. Прочность на сжатие определяли на образцах-кубах с размером ребра 70 мм (ГОСТ 10180–2012), прочность на растяжение при изгибе – на призмах с размерами 100×100×400 мм

Таблица 1. Опытные составы СВПБ

Table 1. Tested UHPC mixes

Состав	Ц	МК	Песок		В/Ц или В/(Ц+МК)	СП*, %	V _f , %	Фибра
			Ц/П	Песок				
Стадия I								
1	1	–	0,5	КП	0,4	–	–	–
2	1		2/3		0,4			
3	1		1		0,4			
4	1		3/2		0,4			
5	1		2		0,4			
Стадия II								
6	1	0,15	1	КП	0,23	1,6	–	–
7	1	0,2	1		0,23	1,6		
8	1	0,3	1		0,23	2		
9	1	0,4	1		0,3	3		
10	1	0,1	1	МП	0,23	2,5	–	–
11	1	0,15	1		0,23	3		
12	1	0,2	1		0,24	3		
13	1	0,3	1		0,25	3		
14	1	0,4	1		0,28	3		
15	1	0,1	1		КП:МП = 2:1	В/Ц = 0,2		
16	1	0,15	1	2				
17	1	0,2	1	2				
18	1	0,15	1	В/(Ц+МК) = 0,2		1,6		
19	1	0,2	1			1,6		
20	1	0,3	1			2		
Стадия III								
21	1	0,2	1	КП:МП = 2:1	В/(Ц+МК) = 0,2	2	1	ПФ
22	1	0,2	1			2	1,5	
23	1	0,2	1			2	2	
24	1	0,2	1			2	1	ВФ
25	1	0,2	1			2	1,5	
26	1	0,2	1			2	2	

* Содержание суперпластификатора указано в виде массовой доли вяжущего.



*Рис. 2. Определение остаточной прочности бетона при растяжении
а – опалубка для изготовления образцов; б – испытание образца*

*Fig. 2. Test for residual tensile strength of concrete
a – formwork for production of samples; b – testing of a sample*

(ГОСТ 10180–2012) и $150 \times 150 \times 550$ мм (СП 360.1325800.2017). После формирования образцы укрывали полиэтиленовой пленкой и хранили при комнатной температуре в течение суток. Затем образцы извлекали из форм и помещали в пропарочную камеру на 16 ч при температуре 90°C . Дальнейшее твердение образцов проходило в нормальных условиях. Испытание образцов производили в возрасте 28 сут. Для составов 7, 12, 17, 19, 22 и 25 (табл. 1) дополнительно испытывали образцы в промежуточном возрасте 7 и 14 сут для получения сведений о наборе прочности во времени.

Российские нормы проектирования сталефибробетонных конструкций (СП 360.1325800.2017), французские нормы для УНРС-конструкций NF P18-470 и рекомендации RILEM TC 162-TDF содержат одинаковую методику определения остаточной прочности на растяжение при изгибе. Она заключается в испытании на трехточечный изгиб свободно опирающейся бетонной балки $150 \times 150 \times 550$ мм и определении нагрузки, соответствующей заданному прогибу балки или раскрытию предварительно устроенной в ней искусственной трещины (надреза). Такие испытания были проведены для составов 22 и 25, показавших оптимальное сочетание прочности и удобоукладываемости. Составы отличались между собой только типом фибры. Образцы-балки производили заливкой в изготовленную для этих целей форму-опалубку из ламинированной фанеры (рис. 2, а).

Нагружение образцов так называемой «следящей» нагрузкой было реализовано достаточно простым способом – усилие создавали механическим домкратом грузоподъемностью 25 т и контролировали электронным динамометром (рис. 2, б). Перемещения внешних граней надреза измеряли цифровым прогибомером ПСК-МГ4 с ценой единицы младшего разряда 0,01 мм.

3. Результаты и обсуждение. Величины расплыва мини-конуса бетонных смесей, значения прочности на сжатие и растяжение при изгибе в возраст-

те 28 сут для всех составов приведены в табл. 2. Распływ мини-конуса находился в диапазоне 180–240 мм. Такую подвижность бетонной смеси можно считать удовлетворительной для самоуплотняющегося СВПБ [21].

На рис. 3 для наглядности бетоны по их составам сгруппированы по варьируемым компонентам. В группу *A* включены составы только с КП и различными значениями Ц/П. Группы *B* и *C* содержат КП и МП с варьируемым содержанием МК. Составы в группах *D* и *E* включали КП и МК в соотношении 2:1 с переменным количеством МК.

Таблица 2. Опытные составы СВПБ

Table 2. Tested UHPC mixes

Состав	Распływ мини-конуса, мм	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Прочность на сжатие, МПа
Стадия I			
1	215	3,62	50,69
2	215	2,51	49,61
3	220	4,44	56,27
4	222	3,95	47,05
5	219	3,98	48,79
Стадия II			
6	230	4,60	134,61
7	190	6,09	142,80
8	180	5,59	115,24
9	180	5,74	134,68
10	180	5,60	123,91
11	210	5,64	125,33
12	185	6,49	135,51
13	180	5,69	125,02
14	220	5,57	120,64
15	230	4,91	133,95
16	235	5,01	134,13
17	240	5,84	141,35
18	230	5,18	127,78
19	210	6,13	145,82
20	195	5,12	128,78
Стадия III			
21	235	8,02	146,72
22	230	11,85	147,29
23	220	14,66	149,80
24	235	14,35	157,10
25	230	14,93	167,31
26	220	15,86	171,78

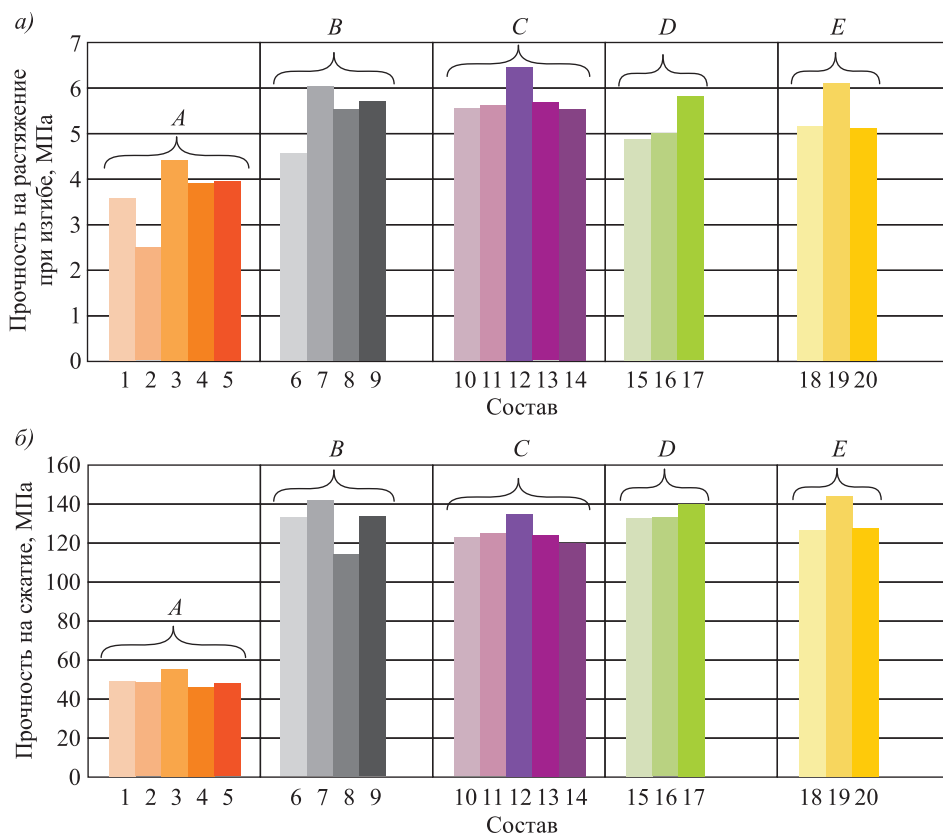


Рис. 3. Прочность на растяжение при изгибе (а) и на сжатие (б) бетонов без фибры
 Fig. 3. Flexural tensile strength (a) and compressive strength (b) of concrete without steel fibers

По итогам испытаний образцов стадии I для дальнейшей работы был выбран состав 3 ($C/P = 1$), показавший наибольшую прочность. Как видно, на стадии II в группах B – E увеличение концентрации МК в принятом диапазоне не привело к росту или снижению прочности бетона. Во всех указанных группах наибольшую прочность продемонстрировали образцы, изготовленные из составов с содержанием МК/C = 0,2. Их прочность на сжатие в среднем оказалась на 10 % выше, чем у остальных образцов групп, прочность на растяжение при изгибе – на 17 %. Для исследований на стадии III был принят состав 19 с расплывом мини-конуса 210 мм и прочностью на сжатие и растяжение, равными соответственно 145,8 и 6,13 МПа.

Рост прочности на сжатие с течением времени после температурно-влажностной обработки был незначительным (рис. 4). Наибольшую разницу между значениями прочности в возрасте 7 и 28 сут (около 10 %) показали образцы, изготовленные из состава 25. В остальных случаях эта разница не превышала 4 %. Для прочности на растяжение изменение во времени происходило по схожей картине.

Добавление фибры привело к существенному росту прочности бетона на растяжение на стадии III в сравнении с образцами из принятого за основу состава 19 со стадии II. При минимальном содержании фибры $V_f = 1\%$ прочность на растяжение выросла в 1,3 и 2,3 раза соответственно для об-

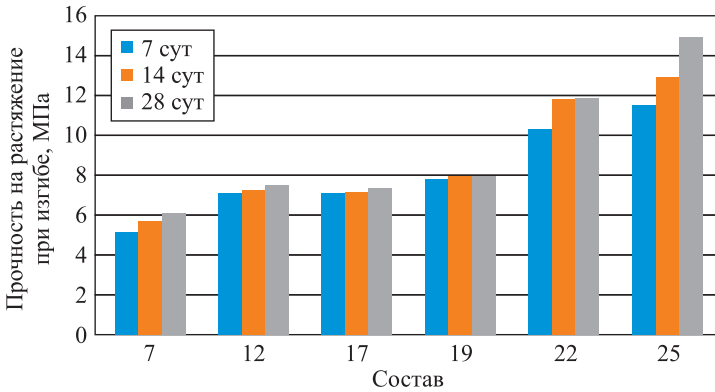


Рис. 4. Изменение во времени прочности бетонов на сжатие

Fig. 4. Change of compressive strength of concrete with time

разцов с прямой и волновой фиброй. В свою очередь, прочность на сжатие увеличилась заметно (на 8–18 %) только при добавлении волновой фибры. Рост прочности на сжатие при добавлении прямой фибры даже при ее максимальной принятой концентрации $V_f = 2\%$ не превысил 3 %.

С увеличением V_f наиболее интенсивно прочность на растяжение росла для образцов с прямой фиброй (рис. 5, а): повышение содержания фибры с 1 до 2 % привело к росту прочности при растяжении на 82 %. Для волновой фибры аналогичный прирост составил лишь 10 %. Прочность на сжатие на рассматриваемом диапазоне V_f увеличилась с повышением содержания фибры на 2 % в образцах с прямой фиброй и на 9 % – с волновой (рис. 5, б). Обращает на себя внимание то, что рост прочности во всех случаях с повышением содержания фибры для рассмотренного диапазона концентраций $V_f = 1–2\%$ был близок к линейному.

Во всех случаях прочность бетона с волновой фиброй существенно выше, чем с прямой. Для прочности на растяжение максимальная разница – около 79 % – получена при наименьшем $V_f = 1\%$ (ср. образцы 21 и 24 в табл. 2). С ростом V_f разница в прочности на растяжение между образцами с прямой и волновой фиброй сокращалась и при $V_f = 2\%$ составила около 8 %. Для прочности на сжатие, напротив, разница между бетонами с разными

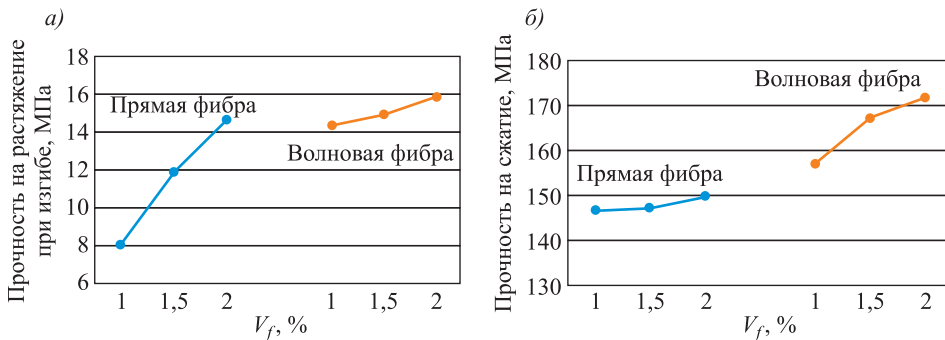


Рис. 5. Прочность бетона на растяжение при изгибе (а) и сжатии (б) при разном содержании фибры

Fig. 5. Flexural tensile (a) and compressive (b) strength of concrete with various fiber concentration

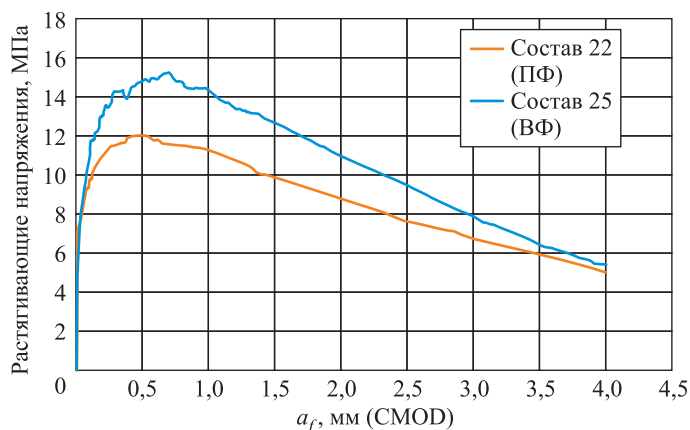


Рис. 6. Зависимость между напряжениями и перемещением внешних граней надреза

Fig. 6. Tensile stress – crack mouth opening diagram

типами фибры с увеличением ее концентрации уменьшилась: при $V_f = 1$ и 2 % она соответственно 7 и 15 %.

Диаграммы развития прогибов и перемещений внешних граней надреза образцов при испытании на растяжение при изгибе является одним из наиболее информативных методов оценки трещиностойкости фибробетонов [22]. На рис. 6 показаны диаграммы деформирования, полученные в результате испытаний на остаточную прочность на растяжение при изгибе образцов-балок (призм) $150 \times 150 \times 550$ мм. На горизонтальной оси отложены значения перемещений внешних граней надреза a_f , мм, по вертикальной – нормальные напряжения, МПа, рассчитанные по формуле

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh_{sp}^2},$$

где F – испытательная нагрузка, кН;

l – пролет балки (550 мм);

b – ширина сечения балки (150 мм);

h_{sp} – отрезок между вершиной надреза и верхней гранью образца (125 мм).

Объемное содержание фибры в составах 22 и 25 1,5 %. Пиковые напряжения R_{Fcl} , соответствующие вершинам диаграмм на рис. 6, равны 15,3 и 12,1 МПа. Разница между этими значениями и сопротивлениями растяжению, полученными на призмах размерами $100 \times 100 \times 400$ мм (см. табл. 2) из тех же составов, составила не более 2,5 %.

За остаточное сопротивление растяжению $R_{F2,5}$ согласно СП 360.1325800.2017 принимают напряжение, соответствующее перемещению внешних граней надреза контрольного образца 2,5 мм. Для составов 22 и 25 величина $R_{F2,5}$ оказалась равной соответственно 9,4 и 7,65 МПа. Более резкое снижение напряжений замечено для состава 25, показавшего большую прочность. Если разница между пиковыми напряжениями R_{Fcl} на диаграммах составляла 21 %, то для $R_{F2,5}$ она уже была равна 19 %, а напряжения, соответствующие раскрытию надреза 4 мм, оказались для данных составов практически равными.

Таблица 3. Оптимальные составы СВПБ

Table 3. Optimal UHPC mixes

Компонент	Состав 22	Состав 25
Ц	1	1
МК	0,2	0,2
Песок		
Ц/П	1	1
КП:МП	2:1	2:1
В/(Ц + МК)	0,2	0,2
СП, %	2	2
V_f , %	1,5	1,5
Фибра	ПФ	ВФ

4. Выводы. 1. Принятая схема оптимизации состава СВПБ с последовательным «наращиванием» набора компонентов при выборе их оптимальных соотношений позволила получить составы самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона с прочностью на сжатие и растяжение при изгибе выше 150 и 14 МПа соответственно.

2. Введение в состав бетона фибры в зависимости от ее концентрации и формы позволило повысить прочность на растяжение при изгибе в 1,3–2,6 раза.

3. Прочность на сжатие образцов с волновой фиброй по сравнению с прочностью неармированных образцов увеличилась на 8–18 %. При введении в состав бетона прямой фибры увеличение прочности бетона на сжатие при максимальной ее концентрации $V_f = 2$ % не превысило 3 %.

4. Дисперсное армирование волновой фиброй показало более высокую эффективность в сравнении с прямой фиброй. Разница в прочности на растяжение между бетонами, имевшими идентичные составы, но отличавшимися формой фибры, достигла 79 %. Для показателя прочности на сжатие максимальная разница составила 15 %.

5. В табл. 3 даны составы СВПБ с прямой и волновой фибрами, показавшие наилучшее сочетание прочности и удобоукладываемости. Указанные составы СВПБ можно применять для изготовления сборных облегченных железобетонных конструкций, в том числе элементов пространственных покрытий, пролетных строений мостов и др.

Список источников

1. Richard P., Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes // Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25, no. 7. P. 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
2. Larrard F., Sedran T. Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model // Cement and Concrete Research. 1994. Vol. 24, no. 6. P. 997–1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
3. Fládr J., Broukalová I., Bily P. Determination of conversion factors for compressive strength of UHPC measured on specimens of different dimensions // Marseille RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. 2013. P. 731–738.

4. *Калашиников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А.* Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8. С. 47–53. <https://doi.org/10.5862/MCE.34.7>
5. *Carey A.S., Howard I.L., Scott D.A., Moser R.D., Shannon J., Knizley A.* Impact of materials, proportioning, and curing on ultra-high-performance concrete properties // ACI Materials Journal. 2020. Vol. 117, no. 1. P. 213–222. <https://doi.org/10.14359/51719076>
6. *Hoang A.L., Fehling E.* Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 135. P. 790–806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>
7. *Azmee N.M., Shafiq N. Shafiq.* Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications // Case Studies in Construction Materials. 2018. Vol. 9. P. 790–806. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>
8. *Serelis E., Vaitkevicius V., Kersevicius V.* Influence of water to cement ratio with different amount of binder on properties of ultra-high performance concrete // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. 2015. Vol. 1, no. 10. P. 78–86. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.10.1.7166>
9. *Dong P.S., Tuan N.V., Thanh L.T., Thang N.C., Cu V.C., Mun J.* Compressive strength development of high-volume fly ash ultra-high-performance concrete under heat curing condition with time // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 20. <https://doi.org/10.3390/app10207107>
10. *Мишина А.В., Безгодов И.М., Андрианов А.А.* Прогнозирование предельных деформаций ползучести сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 66–70. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2012.12.66-70>
11. *Гамалий Е.А., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я.* Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбоксилатного пластификатора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2009. № 8. С. 29–35.
12. *Vutanis G., Toropovs N., Dembovska L., Bajare D., Korjakins A.* The effect of heat treatment on the properties of ultra high strength concrete // Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. 2015. Vol. 1. P. 22–27. <http://dx.doi.org/10.17770/etr2015vol1.209>
13. *Selleng C., Simon S., Patrick F., Meng B.* Possibilities for improving the properties of UHPC by means of thermal treatment // RILEM Publications S.A.R.L. 2017. P. 83–92.
14. *Graybeal B.A.* Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // ACI Materials Journal. 2007. Vol. 104. P. 146–152. <https://doi.org/10.14359/18577>
15. *Карпенко Н.И., Травуш В.И., Каприелов С.С., Мишина А.В., Андрианов А.А., Безгодов И.М.* Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона // Строительные науки. 2013. № 1. С. 106–112.
16. *Каприелов С.С., Чилин И.А.* Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Вестник НИЦ «Строительство». 2017. № 1. С. 14–22.
17. *Fotouhi F., Ashkezari G.D., Razmara M.* Experimental relationships between steel fiber volume fraction and mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101613>
18. *Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И.* Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1. С. 172–176.

19. Yu R., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC) – Towards an efficient utilization of binders and fibres // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. P. 273–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050>
20. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents // *RILEM Materials and Structures*. 2011. Vol. 44, no. 3. P. 583–598. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9650-4>
21. Aghdasi P., Heid A.E., Chao Sh. Developing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for large-scale structural applications // *ACI Materials Journal*. 2016. Vol. 113, no. 5. P. 559–570. <https://doi.org/10.14359/51689103>
22. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволочной фиброй // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 2. С. 143–147.

References

1. Richard P., Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995; 25(7): 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
2. Larrard F., Sedran T. Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*. 1994; 24(6): 997–1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
3. Fládr J., Broukalová I., Bílý P. Determination of conversion factors for compressive strength of UHPC measured on specimens of different dimensions. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Marseille: RILEM-fib-AFGC Int. 2013. P. 731–738.
4. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. New generation concrete based on dry fine-grained powder. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal = Engineering and Construction Magazine*. 2012; 8(34): 47–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.34.7>
5. Carey A.S., Howard I.L., Scott D.A., Moser R.D., Shannon J., Knizley A. Impact of materials, proportioning, and curing on ultra-high-performance concrete properties. *ACI Materials Journal*. 2020; 117(1): 213–222. <https://doi.org/10.14359/51719076>
6. Hoang A.L., Fehling E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2017; (135): 790–806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>
7. Azmee N.M., Shafiq N. Shafiq. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2018; (9): 790–806. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>
8. Serelis E., Vaitkevicius V., Kersevicius V. Influence of water to cement ratio with different amount of binder on properties of ultra-high performance concrete. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2015; 1(10): 78–86. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.10.1.7166>
9. Dong P.S., Tuan N.V., Thanh L.T., Thang N.C., Cu V.C., Mun J. Compressive strength development of high-volume fly ash ultra-high-performance concrete under heat curing condition with Time. *Applied Sciences*. 2020; 10(20). <https://doi.org/10.3390/app10207107>
10. Mishina A.V., Bezgodov I.M., Andrianov A.A. Prediction of maximum creep strain of high performance steel fiber reinforced concrete. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2012; (12): 66–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2012.12.66-70>

11. Gamaliy E.A., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. Structure and properties of cement stone with additives of silica and polycarboxylate plasticizer. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*. 2009; (8): 29–35. (In Russ.).
12. Bumanis G., Toropovs N., Dembovska L., Bajare D., Korjakins A. The effect of heat treatment on the properties of ultra high strength concrete. Environment. Technology. Resources, Rezekne, Latvia. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. 2015; (1): 22–27. <http://dx.doi.org/10.17770/etr2015vol1.209>
13. Selleng C., Simon S., Patrick F., Meng B. Possibilities for improving the properties of UHPC by means of thermal treatment. *RILEM Publications S.A.R.L.* 2017: 83–92.
14. Graybeal B.A. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*. 2007; (104): 146–152. <https://doi.org/10.14359/18577>
15. Karpenko N.I., Travush V.I., Kapriyelov S.S., Mishina A.V., Andrianov A.A., Bezgodov I.M. Investigation of physico-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber concrete. *Stroitel'nyye nauki = Building Sciences*. 2013; (1): 106–112. (In Russ.).
16. Kapriyelov S.S., Chilin I.A. Super high-strength self-sealing fiber concrete for monolithic structures. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo» = Bulletin of SIC «Construction»*. 2017; 1(12): 14–22. (In Russ.).
17. Fotouhi F., Ashkezari G.D., Razmara M. Experimental relationships between steel fiber volume fraction and mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*. 2019; (32). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101613>
18. Pukharensko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Determination of fiber contribution in creation of the strength of steel fiber reinforced concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin for civil engineers*. 2017; 1 (60): 172–176. (In Russ.).
19. Yu R., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC) – Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*. 2015; (79): 273–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050>
20. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *RILEM Materials and Structures*. 2011; 44(3): 583–598. DOI: 10.1617/s11527-010-9650-4
21. Aghdasi P., Heid A.E., Chao Sh. Developing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for large-scale structural applications. *ACI Materials Journal*. 2016; 113(5): 559–570. <https://doi.org/10.14359/51689103>
22. Pukharensko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Diagrams of deformation of cement composites reinforced with steel wire fiber. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo = Academia. Architecture and construction*. 2018; (2): 143–147. (In Russ.).

Информация об авторах

М.М. Тамов – кандидат технических наук, доцент, murat.tamov@gmail.com

М.И.Ф. Салиб – аспирант, minasalib12345@gmail.com

Ю.К.И. Абузизех – аспирант, yousef.qasem1993@gmail.com

О.Д. Софьяников – аспирант, oleg.sofianikov@gmail.com

Information about the authors

M.M. Tamov – PhD, Ass. Professor, murat.tamov@gmail.com

M.I.F. Salib – Post-graduate Student, minasalib12345@gmail.com

Y.Q.Y. Abuizeh – Post-graduate Student, yousef.qasem1993@gmail.com

O.D. Sofianikov – Post-graduate Student, oleg.sofianikov@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022
Одобрена после рецензирования 31.03.2022
Принята к публикации 07.04.2022

The article was submitted 28.02.2022
Approved after reviewing 31.03.2022
Accepted for publication 07.04.2022