

УДК 691.32

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-135-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-135-147)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE PROPERTIES OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE

И. А. ЧИЛИН

Приведены результаты исследований и выполнена оценка влияния технологических факторов на реологические свойства самоуплотняющихся сталефибробетонных смесей, определены кратковременные и длительные физико-механические и деформативные характеристики сверхвысокопрочного сталефибробетона, включая определение его фактической морозостойкости.

The results are given and the influence of technological factors on the rheological properties of self-compacting steel-fibre reinforced-concrete mixtures is assessed, short-term and long-term physical-mechanical and deformative characteristics of ultra-high-performance-fibre reinforced concrete are determined, including the determination of its actual frost resistance.

Ключевые слова:

Сверхвысокопрочный бетон, сталефибробетон, физико-механические свойства, самоуплотняющийся бетон, деформативные характеристики, сегрегационная устойчивость

Key words:

Deformation characteristics, physical and mechanical properties, self-compacting concrete, segregation resistance, steel fiber reinforced concrete, ultra-high-performance concrete

Введение

За последние три десятилетия в строительной индустрии увеличилась потребность в бетонах с повышенными прочностными, деформативными и эксплуатационными свойствами. Уже реальностью становится возможность производства и применения при проектировании конструкций гражданских, транспортных и специальных сооружений тяжёлых бетонов с пределом прочности при сжатии до 200 МПа и выше [1, 2, 4, 6].

Применение таких бетонов позволяет сократить сроки строительства и уменьшить конструктивную массу здания в результате возведения из сверхвысокопрочного бетона облегченных конструкций с уменьшенным рабочим сечением. Одним из видов таких бетонов является сверхвысокопрочный сталефибробетон (СВФБ). За рубежом он имеет устоявшийся термин Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, который уже внесен в ряд европейских стандартов [3, 10, 11].

Однако известно, что с повышением прочности на сжатие, а соответственно, и модуля упругости, увеличивается и хрупкость материала, что в случае с бетоном следует расценивать как неблагоприятный фактор из-за мгновенного, взрывообразного, характера разрушения конструкции при запредельных нагрузках.

Одним из путей решения этой проблемы является дисперсное армирование бетона, которое во многих случаях представляется более эффективным способом повышения трещиностойкости конструкций и снижения хрупкости.

Основой СВФБ должна быть высококачественная «матрица» – бетон, состоящий из сверхвысокопрочного и плотного цементного камня и мелкого заполнителя. Предпочтительно в качестве матрицы использовать аналог порошкового бетона – в английской терминологии «Reactive Powder Concrete», с прочностью на сжатие, при твердении в нормальных условиях достигающей 200 МПа, а при температурной обработке – и более [7].

Имеющийся у нас научный задел [8, 9] и опыт применения СВФБ открывает возможность получения дисперсно-армированных бетонов классов по прочности на сжатие B_{f110} – B_{f160} , с пределами прочности на осевое растяжение $R_{fbt} = 8...10$ МПа, на растяжение при изгибе $R_{fntb} = 22...25$ МПа и выше, приготовленных из подвижных, самоуплотняющихся, смесей. Начальный модуль упругости таких бетонов E_{fn} может достигать 55-60 ГПа.

Особый интерес представляет оценка влияния типоразмеров и дозировок стальной фибры, вида и дозировок вяжущего, добавок и заполнителей на получение седиментационно-устойчивых самоуплотняющихся дисперсно-армированных смесей и на физико-механические характеристики СВФБ. Решению именно этих вопросов были посвящены эксперименты, результаты которых приводятся далее.

2. Основные компоненты смесей и методы испытаний

2.1. Компоненты бетонных смесей

Основные компоненты смесей и их характеристики следующие.

1. Портландцемент марки ПЦ 500 ДОН или ЦЕМ I 52,5Н, соответствующий ГОСТ 10178 или ГОСТ 31108.

2. Заполнитель – кварцевый песок, состоящий из набора стандартных фракций от 0 до 5 мм, в котором доля частиц фракций не более 0,63 мм составляла 50 – 65%.

3. Минеральный порошок неактивированный марки МП-1, выпускаемый в соответствии с ГОСТ Р 52129 и представляющий собой молотый известняк с максимальной крупностью зерен менее 1,25 мм.

4. Органоминеральный модификатор МБ – порошкообразный продукт насыпной плотностью 850 кг/м³, содержащий микрокремнезем, золу-унос, суперпластификатор на основе поликарбоксилатов.

5. Стальная фибра различного диаметра и профиля длиной от 13 до 30 мм (временное сопротивление разрыву не менее 1200 МПа, модуль упругости 200 ГПа).

2.2. Методики испытаний

Для оценки свойств дисперсно-армированных смесей и бетона использовались как стандартизированные методики испытаний, соответствующие нормативным документам, так и нестандартные, специально разработанные для решения конкретных задач.

Удобоукладываемость, средняя плотность, водоотделение, сохраняемость бетонной смеси определялись в соответствии с ГОСТ 10181.

Прочность кубов на сжатие R_f определялись по образцам-кубам размером $100 \times 100 \times 100$ мм, прочность призм на сжатие R_{fb} определялась по образцам-призмам $100 \times 100 \times 400$ мм, прочность на растяжение при изгибе R_{fbb} – по образцам-призмам размером $100 \times 100 \times 400$ мм, прочность на осевое растяжение R_{fbr} – по образцам-галтелям с рабочим сечением 70×70 мм. Все характеристики определялись в соответствии с ГОСТ 10180.

Начальный модуль упругости E_{fj} определялся на призмах размером $100 \times 100 \times 400$ мм в соответствии с ГОСТ 24452, динамический – путем измерения резонансной частоты вынужденных колебаний.

Морозостойкость оценивали по изменениям прочности на сжатие, динамического модуля упругости и массы образцов в процессе циклического замораживания при -50°C и оттаивания в растворе NaCl пятипроцентной концентрации (3-й метод ГОСТ 10060-2012).

Все образцы выдерживались в нормальных температурно-влажностных условиях (относительная влажность 95-98%, температура $18-22^\circ\text{C}$).

Деформации усадки и ползучести определялись на образцах-призмах с размером $70 \times 70 \times 280$ мм в соответствии с ГОСТ 24544-81 при различном возрасте начала нагружения (7, 28 и 100 сут).

Сегрегационная устойчивость бетонных смесей оценивалась по специальной методике, которая приводится далее.

На жесткий гладкий металлический лист устанавливается блокировочное кольцо по EN 12350-12, внутрь которого устанавливается нормальный конус, соответствующий ГОСТ 10181.

Бетонная смесь укладывается в конус без штыкования и определяется ее подвижность по распылу конуса после растекания смеси с прохождением сквозь преграду – блокировочное кольцо (J-кольцо).

После растекания бетонной смеси отбираются порции смеси из центральной зоны (внутри кольца) и из двух диаметрально противоположных зон вне кольца, находящихся на периферии окружности расплыва.

Отобранные порции с уплотнением помещаются в мерные сосуды объемом $0,001 \text{ м}^3$, после чего определяется значение плотности смеси внутри кольца Y_1 и значения плотностей из двух участков на периферии расплыва (Y_2 , Y_3).

Сегрегационная устойчивость оценивается по условному фактору-коэффициенту K_{cy} , который рассчитывается по формуле

$$K_{cy} = \frac{Y_2 + Y_3}{2Y_1} \geq 0,98, \quad (1)$$

где Y_1 – плотность смеси в центре, кг/м^3 ;

Y_2 и Y_3 – плотность смеси на диаметрально противоположных участках расплыва, кг/м^3 .






В случаях, когда $K_{cy} < 0,98$, дисперсно-армированная стальная фиброй смесь считается сегрегационно неустойчивой, т. е. расслоившейся.

3. Влияние характеристик фибры на свойства смесей и бетона

Для определения влияния типоразмеров фибры на подвижность и сегрегационную устойчивость самоуплотняющихся смесей и кратковременные физико-механические свойства бетонов применялись пять разновидностей стальной фибры из высокоуглеродистой стали с одинаковыми физико-техническими характеристиками, но отличающиеся профилем, длиной l и номинальным диаметром d , а соответственно, индексом фибры (отношение длины к диаметру). Характеристики образцов фибры приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики стальной фибры

№	Характеристика профиля фибры	Длина l , мм	Номинальный диаметр d , мм	Индекс фибры l/d	Минимальное временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	Модуль упругости, ГПа	Производитель фибры
1.	Прямая 	13	0,22	59	1000	200	ОАО «Северсталь-Метиз»*
2.	Прямая 	13	0,30	43	1000	200	ОАО «БМЗ»**
3.	Волновая 	15	0,30	50	1000	200	ОАО «БМЗ»
4.	Волновая 	22	0,30	73	1000	200	ОАО «БМЗ»
5.	Анкерная 	30	0,30	100	1000	200	ОАО «БМЗ»

* ОАО «Северсталь-Метиз», Череповецкий металлургический завод, РФ, г. Череповец

** ОАО «БМЗ» – Белорусский металлургический завод, г. Злобин, Республика Беларусь

Исследования проводились в два этапа. Сначала, определялось влияние вида фибры на свойства дисперсно-армированных смесей, а также на физико-механические характеристики СВФБ, приготовленных по одинаковому составу (с одинаковым соотношением компонентов), но содержащих фибру разных типоразмеров: прямую и волновую разных диаметров и длин, а также анкерную.

Свойства дисперсно-армированных смесей и бетонов приведены в табл. 3.2.

Как следует из приведенных в табл. 3.2 результатов, характер профиля влияет на подвижность и сегрегационную устойчивость.

Влияние профиля на подвижность незначительное: несмотря на то что распływ конуса у смесей с волновой и анкерной фиброй меньше, чем у смесей с фиброй прямого профиля, все смеси высокоподвижные и по этому параметру могут быть отнесены к категории самоуплотняющихся.

Однако влияние профиля фибры на сегрегационную устойчивость более значительное: по выбранному критерию оценки – коэффициенту $K_{cy} \geq 0,98$ (см. методику, описанную ранее) – смеси с фиброй волнового и анкерного профилей, в отличие от смесей с прямой фиброй, при растекании сквозь «блокировочное кольцо» расслаиваются.

Необходимо отметить, что введение фибры диаметром 0,22 мм и более высокий индексом l/d предпочтительнее в отношении увеличения значений прочностей как на центральное сжатие, так и на растяжение осевое и при изгибе. Отметим, что аналогичный результат получен и другими специалистами [5], обнаружившими, что энергия разрушения при испытаниях

Таблица 3.2

Влияние профиля фибры на подвижность и сегрегационную устойчивость

№	Характеристика профиля и индекс фибры l/d по табл. 3.1	Предел прочности бетона в возрасте 28 сут, МПа				Подвижность смеси РК, см	Плотность смеси в зонах отбора проб, кг/м ³			Коэффициент сегрегационной устойчивости, K_{cy}
		R_f	R_{fb}	R_{fbt}	R_{fbt}		Зона 1 (Y1)	Зона 2 (Y2)	Зона 3 (Y3)	
1	Прямой (59)	161,8	144,6	25,2	11,6	74	2434	2425	2423	1,00
2	Прямой (43)	155,3	138,7	20,7	10,4	72	2427	2436	2431	1,00
3	Волновой (50)	157,3	139,6	19,9	10,3	68	2472	2412	2401	0,97
4	Волновой (73)	154,2	138,8	21,6	10,8	68	2479	2404	2396	0,97
5	Анкерный (100)	158,8	141,9	22,1	10,6	67	2496	2386	2391	0,96

Примечание – Смесь считается сегрегационно устойчивой, если соблюдается соотношение $K_{cy} \geq 0,98$.

на растяжение при изгибе повышается по мере роста индекса фибры l/d при использовании для дисперсного армирования фибры диаметром от 0,13 мм до 0,22 мм.

Очевидно, это связано с тем, что в объеме бетонной матрицы удельное содержание армирующих волокон повышается с уменьшением диаметра фибры. В нашем случае расчет показывает, что количество волокон стальной фибры диаметром 22 мм в 1 м³ бетонной матрицы составляет $39 \cdot 10^7$ шт., что в 1,5 раз больше, чем удельное количество волокон фибры диаметром 0,3 мм.

Из изложенного следует, что для производства СВФБ из самоуплотняющихся смесей необходимо ориентироваться на использование фибры прямого профиля с диаметром не более 0,3 мм, с которой при сопоставимых значениях прочностей обеспечивается седиментационная устойчивость смесей.

На втором этапе определяли влияние дозировок фибры на подвижность и седиментационную устойчивость путем испытаний образцов дисперсно-армированных смесей одинакового состава бетонной матрицы, но с разными дозировками фибры прямого профиля, которая оказалась предпочтительной по результатам, полученным на первом этапе исследования.

Дозировки фибры прямого профиля с индексом $l/d = 43$ составляли 100, 120, 150, 180, 210 кг/м³. Результаты испытаний бетонных смесей и бетонов приведены в табл. 3.3 и на рис. 3.1 и 3.2.

Из результатов следует, что подвижность смесей снижается по мере увеличения дозировки фибры прямого профиля от 100 до 210 кг/м³. Однако при этом все дисперсно-армированные смеси остаются седиментационно устойчивыми и относятся к категории самоуплотняющихся.

Таким образом, дозировка фибры конкретного типоразмера в диапазоне от 100 до 210 кг/м³ практически не влияет на подвижность и седиментационную устойчивость самоуплотняющихся смесей, которые зависят от реологических характеристик бетонной матрицы.

Однако влияние дозировки фибры на физико-механические свойства бетонов значительно. Так, с увеличением количества фибры от 100 до 210 кг/м³ прочностные характеристики сталефибробетона повышаются. В меньшей степени увеличивается прочность на центральное

Таблица 3.3

Свойства дисперсно-армированных смесей с разной дозировкой фибры

№	Вид профиля фибры	Расход фибры, кг/м³ R _f	Предел прочности бетона в возрасте 28 сут, МПа				Подвижность смеси (РК), см Зона 1 (Y ₁)	Плотность смеси в зонах отбора проб, кг/м³			Коэффициент сегрегационной устойчивости, K _{cy}
			R _f	R _{fb}	R _{fbtb}	R _{fbt}		Зона 1 (Y ₁)	Зона 2 (Y ₂)	Зона 3 (Y ₃)	
1	Прямая	100	148,0	131,8	16,6	7,7	70	2396	2391	2404	1,00
2	Прямая	120	150,7	131,2	17,4	8,5	72	2418	2421	2416	1,00
3	Прямая	150	151,4	132,5	19,5	10,0	72	2458	2449	2455	1,00
4	Прямая	180	152,6	133,9	22,3	10,8	71	2471	2483	2488	1,01
5	Прямая	210	151,3	132,4	23,6	10,6	62	2512	2498	2508	1,00

Примечание – Смесь считается сегрегационно устойчивой, если соблюдается соотношение $K_{cy} \geq 0,98$

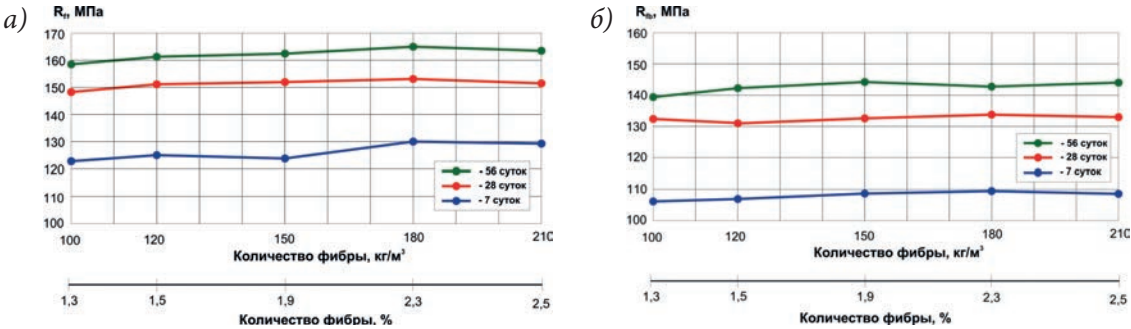


Рис. 3.1. Влияние дозировок фибры на пределы прочности дисперсно-армированных бетонов при осевом сжатии кубов [а] и призм [б]

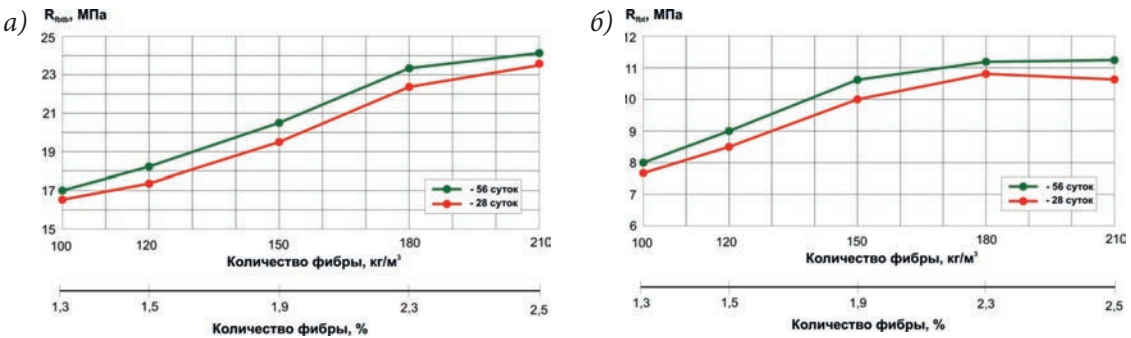


Рис. 3.2. Влияние дозировок фибры на пределы прочности дисперсно-армированных бетонов, на растяжение при изгибе [а] и осевое растяжение [б]

сжатие, кубиковая и призмная (около 3%), более значительное влияние дозировка фибры оказывает на прочность при растяжении осевом и при изгибе (около 40-45%).

Необходимо отметить, что своеобразным порогом эффективности вводимой фибры является дозировка 180 кг/м³, что составляет 2,3% от объема бетона. При этой дозировке достигаются наилучшие показатели по реологическим свойствам смеси и физико-механи-

ческим характеристикам бетона. Введение фибры в количестве более 2,5% от объема бетона приведет, вероятнее всего, к повышению физико-механических характеристик, однако такая дозировка будет негативно влиять на реологические свойства смеси, что не позволит отнести ее к категории самоуплотняющихся.

4. Деформативные характеристики и морозостойкости

Модуль упругости, деформации ползучести и морозостойкость являются одними из важных нормируемых характеристик бетона, влияющих на эксплуатационные свойства конструкций, в том числе и транспортных сооружений. Проведены исследования с целью определения зависимости статического (начального) и динамического модулей упругости от состава СВФБ, в котором бетонная матрица содержала разное количество вяжущего, соответственно, цемента, органоминерального модификатора и минерального порошка, но дозировка фибры оставалась постоянной – на уровне 180 кг/м^3 , при которой достигаются наилучшие показатели по прочности на растяжение.

Деформации ползучести определялись на образцах-призмах, изготовленных из бетона без фибры «матрицы» и с дозировкой фибры 1,5% от объема, с целью определения влияния стальной фибры на деформации ползучести.

Морозостойкость исследовали на образцах, приготовленных из смеси с той же дозировкой фибры (180 кг/м^3) и максимальным расходом вяжущего, включающего в свой состав цемент (900 кг/м^3) и органоминеральный модификатор (350 кг/м^3).

4.1. Модуль упругости

Образцы для испытаний приготовлены из смесей, в составах которых расход активных компонентов составлял: цемент 700-900 кг/м^3 , органоминеральный модификатор МБ в диапазоне 180-350 кг/м^3 .

Соответственно различались и прочностные характеристики бетонов. В табл. 4.1 приведены прочностные свойства и значения начального E_{fi} и динамического E_{fdin} модулей упругости.

Таблица 4.1

Свойства дисперсно-армированных смесей, прочностные и деформативные характеристики бетонов

№	Класс бетона при коэфф. вариации 10%	Подвижность смеси (РК), см	Пределы прочности бетона в возрасте, сут.							
			28		90		28		90	
			R_f	R_{fbt}	R_f	R_{fbt}	E_{fi}	E_{fdin}	E_{fi}	E_{fdin}
1	B160	53	171,4	10,9	182,6	11,9	50,3	55,0	51,7	56,5
2	B135	56	142,6	8,8	154,3	9,6	47,6	52,8	48,3	54,2
3	B110	55	116,5	6,8	123,6	7,3	43,0	46,1	44,1	47,3

Как видно из данных табл. 4.1, значения начального модуля сталефибробетона с матрицей из сверхвысокопрочного мелкозернистого бетона повышаются с увеличением класса бетона, достигая 50 ГПа, что значительно превосходит нормативные значения для тяжелого бетона, предусмотренные СП 63.13330.2012.

Вместе с тем привлекает внимание небольшая разница между значениями статического и динамического модулей упругости: соотношение между ними (E_{fi} / E_{fdin}) не выше 0,9.

4.2. Деформаций ползучести мелкозернистого высокопрочного бетона и СВФБ при различном возрасте нагружения

Проведены испытания двух серий образцов – призм размером 70×70×280 мм, изготовленных из бетонов с физико-механическими характеристиками, представленными в табл. 4.2. Первая серия образцов являлась «матрицей» (маркировка МВБ), а во вторую вводилась фибра прямого профиля диаметром 0,3 мм и длиной 13 мм в количестве 1,5% от объема (маркировка СВФБ). Бетонные смеси двух серий относились к категории самоуплотняющихся, с распылом конуса более 60 см.

Таблица 4.2

Физико-механические характеристики испытываемых бетонов

Возраст, сут	Вид бетона	R_b , МПа	$E_b \times 10^3$, МПа	ν_b
7	МВБ	80,3	35,4	0,281
	СВФБ	87,2	37,5	0,276
28	МВБ	102,7	40,5	0,295
	СВФБ	111,5	43,1	0,299
100	МВБ	104,7	40,4	0,291
	СВФБ	117,3	44,3	0,285
240	МВБ	108,90	41,2	0,289
	СВФБ	122,8	44,0	0,290

Загрузка образцов осуществлялась в возрасте 7, 28 и 100 сут для обеих серий. С целью поддержания температурно-влажностного режима внутри образца выполнена изоляция двумя слоями парафина. Для измерения продольных и поперечных деформаций использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 и 0,001 мм.

Перед загрузкой на длительное воздействие проводились кратковременные испытания с целью определения призмочной прочности и других физико-механических характеристик для данного возраста. По результатам оценки средней призмочной прочности определялся относительный уровень 0,3, 0,6 и 0,8 R_b для проведения длительных испытаний. В соответствии с заданным уровнем нагружения, в целях поддержания длительного времени проектного усилия были закачаны воздушно-масляные баллоны. Нагрузка осуществлялась 200-тонными домкратами. В систему контроля за уровнем нагрузки входили манометры.

Для определения деформаций ползучести были установлены два образца без нагрузки, которые находились рядом с нагруженными образцами. В помещении поддерживался постоянный температурно-влажностный режим, который контролировался с помощью психрометра.

Длительность нагрузки составляла 180 сут, а затем образцы разгружались и рассматривались деформации последствия в течение 60 сут.

В результате проведенных экспериментальных исследований ползучести мелкозернистого высокопрочного бетона-матрицы (МВБ) и сталефибробетона СВФБ были построены кривые ползучести во времени для 0,3, 0,6 и 0,8 R_b .

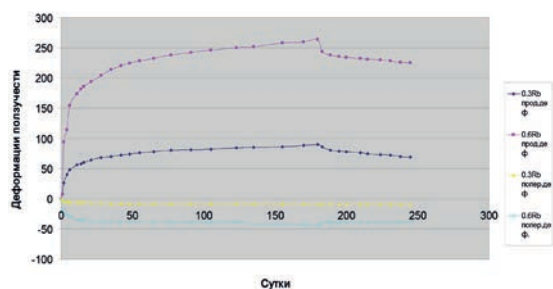


Рис. 4.1. Кривые относительных деформаций ползучести МВБ, загруженного в 7 сут

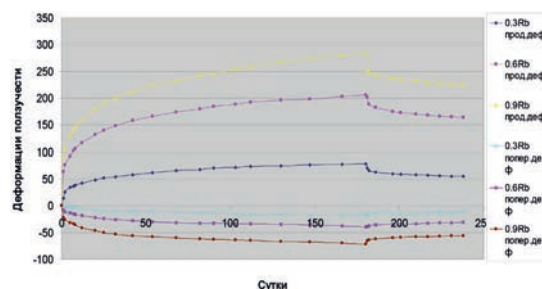


Рис. 4.2. Кривые относительных деформаций ползучести МВБ, загруженного в 28 сут

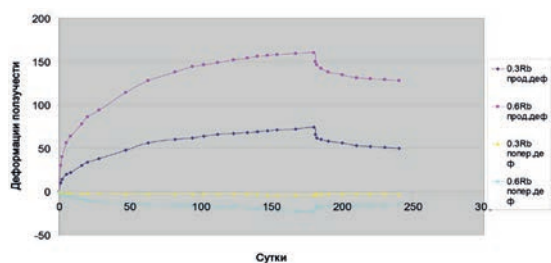


Рис. 4.3. Кривые относительных деформаций ползучести МВБ, загруженного в 100 сут

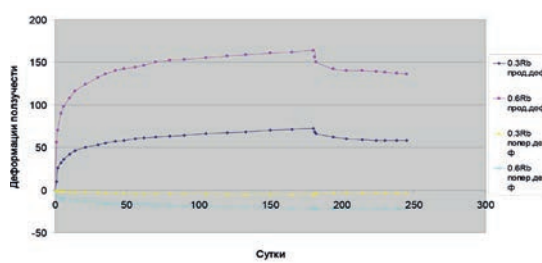


Рис. 4.4. Кривые относительных деформаций ползучести СВФБ, загруженного в 7 сут

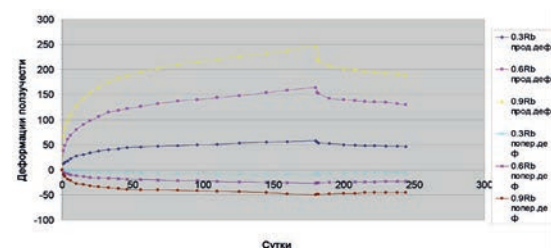


Рис. 4.5. Кривые относительных деформаций ползучести СВФБ, загруженного в 28 сут

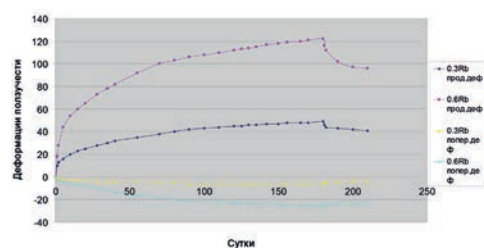


Рис. 4.6. Кривые относительных деформаций ползучести СВФБ, загруженного в 100 сут

Кривые деформаций ползучести образцов МВБ во времени (до 180 сут), загруженных в возрасте 7 сут, 28 сут и 100 сут, приведены соответственно на рис. 4.1-4.3. Аналогичные кривые деформаций ползучести СВФБ приведены на рис. 4.4-4.6.

В табл. 4.4 приведены значения продольных ε_{b1}^n и поперечных ε_{b2}^n деформаций ползучести образцов, замеренных в возрасте 180 сут, а также мгновенно упругих деформаций ε_{b1}^y , ε_{b2}^y , замеренные в начале загрузки, а также значения общих деформаций $\varepsilon_{b1}^y + \varepsilon_{b1}^n$ и $\varepsilon_{b2}^y + \varepsilon_{b2}^n$ при загрузке образцов в 7, 28 и 100 сут.

В табл. 4.5 приведены значения обратимых продольных ($\varepsilon_{b1(p)}^n$) и поперечных ($\varepsilon_{b2(p)}^n$) деформаций ползучести за время разгрузки $t = (240-180)$ сут, а также аналогичных $\varepsilon_{b1(p)}^y$, $\varepsilon_{b2(p)}^y$ упруго-мгновенных обратимых деформаций ползучести в начале разгрузки ($t = 180$). Также приводятся общие обратимые деформации ($\varepsilon_{b1(p)}^y + \varepsilon_{b1(p)}^n$), ($\varepsilon_{b2(p)}^y + \varepsilon_{b2(p)}^n$).

Таблица 4.4

Значения продольных и поперечных деформаций ползучести бетона

Загрузка								
Обозначение образцов	Возраст, сут	$\frac{\sigma_b}{R_b}$	$\varepsilon^y_{b1}, \times 10^{-5}$	$\varepsilon^n_{b1}, \times 10^{-5}$	$\Sigma(\varepsilon^y_{b1} + \varepsilon^n_{b1})$	$\varepsilon^y_{b2}, \times 10^{-5}$	$\varepsilon^n_{b2}, \times 10^{-5}$	$\Sigma(\varepsilon^y_{b2} + \varepsilon^n_{b2})$
МВБ	7	0,3	77,00	91,61	168,61	20,67	10,10	30,77
		0,6	156,91	267,24	424,15	47,14	43,79	90,93
	28	0,3	84,92	78,20	163,12	24,91	17,40	42,31
		0,6	180,16	212,22	392,38	51,35	38,89	90,24
		0,8	221,50	285,13	506,63	68,75	73,13	141,88
	100	0,3	104,49	72,25	176,74	30,00	6,71	36,71
		0,6	171,24	163,49	334,73	48,76	29,91	78,67
СВФБ	7	0,3	70,67	73,42	144,09	19,20	4,50	23,70
		0,6	139,83	165,42	305,25	37,41	21,50	58,91
	28	0,3	76,67	59,17	135,84	22,23	9,63	31,86
		0,6	166,01	165,77	331,78	45,78	27,32	73,10
		0,8	204,58	245,31	449,89	63,39	48,96	112,35
	100	0,3	76,09	50,26	126,35	21,52	5,85	27,37
		0,6	165,33	122,00	287,33	46,66	26,20	72,86

Примечания:
 ϵ^y_{b1} – продольные упругие деформации, определяемые в момент загрузки;
 ϵ^n_{b1} – продольные деформации ползучести в возрасте 180 сут;
 ϵ^y_{b2} – поперечные упругие деформации, определяемые в момент загрузки;
 ϵ^n_{b2} – поперечные деформации ползучести, определяемые в возрасте 180 сут.

Таблица 4.5

Значения обратимых продольных и поперечных деформаций ползучести бетона

Разгрузка								
Обозначение образцов	Возраст, сут	$\frac{\sigma_b}{R_b}$	$\epsilon^y_{b1(p)}, \times 10^{-5}$	$\epsilon^n_{b1(p)}, \times 10^{-5}$	$\Sigma(\epsilon^y_{b1(p)} + \epsilon^n_{b1(p)})$	$\epsilon^y_{b2(p)}, \times 10^{-5}$	$\epsilon^n_{b2(p)}, \times 10^{-5}$	$\Sigma(\epsilon^y_{b2(p)} + \epsilon^n_{b2(p)})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
МВБ	7	0,3	70,84	15,76	86,60	18,48	1,2	19,68
		0,6	141,25	38,36	179,61	35,55	4,89	40,44
	28	0,3	78,75	24,38	99,13	23,75	4,12	68,31
		0,6	157,00	46,42	203,42	43,57	6,47	50,04
		0,8	191,00	60,14	251,14	53,02	15,60	68,62
	100	0,3	104,92	31,97	136,89	28,30	4,25	32,55
		0,6	174,34	52,30	226,64	46,88	7,03	53,91
	СВФБ	7	0,3	64,33	12,84	77,17	16,78	0,96
0,6			116,58	27,53	144,11	29,11	0,62	29,73
28		0,3	71,59	12,32	83,91	20,80	2,81	66,12
		0,6	156,42	34,57	190,99	37,83	4,68	42,51
		0,8	191,34	54,79	246,13	48,17	3,05	51,22
100		0,3	71,00	13,00	84,00	25,18	3,00	28,18
		0,6	178,67	36,00	214,67	43,39	5,00	48,39

Примечания:

$\varepsilon_{b1(p)}^y$ – продольные упругие деформации, определяемые в момент разгрузки (в возрасте 180 сут);

$\varepsilon_{b1(p)}^n$ – продольные деформации обратной ползучести в возрасте 240 сут (за время 240 – 180 = 60 сут);

$\varepsilon_{b2(p)}^y$ – поперечные упругие деформации, определяемые в момент разгрузки (в возрасте 180 сут);

$\varepsilon_{b2(p)}^n$ – поперечные деформации обратной ползучести, определяемые в возрасте 240 сут (за время 240 – 180 = 60 сут).

Анализируя кривые деформации ползучести для МВБ и СВФБ, загруженных в возрасте 7, 28 и 100 сут, можно сделать ряд выводов, характерных для обоих бетонов:

- с увеличением возраста бетона деформации ползучести сокращаются;
- деформации ползучести у СВФБ значительно ниже, чем у МВБ при любом возрасте нагружения;
- коэффициент поперечной деформации ползучести (КПДП) значительно ниже упругого коэффициента поперечной деформации (КПД), что отражается на поперечных деформациях;
- деформации последствия (обратимые деформации ползучести) отличаются незначительно, у МВБ и СВФБ несколько меньше, однако при этом остаточные деформации ползучести МВБ значительно превышают аналогичные деформации СВФБ;
- обратимые поперечные деформации для низкого уровня нагружения $0,3 R_b$ практически отсутствуют.

4.3. Определение морозостойкости при воздействии солей

Проведено испытание образцов СВФБ с оценкой изменения прочности на сжатие и массы в процессе циклического замораживания при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и оттаивания в 5%-ном водном растворе хлорида натрия.

Таблица 4.6

Результаты испытаний контрольных образцов бетона на морозостойкость по ГОСТ 10060-2012 (3-й метод)

Маркировка Заказчика	Метод испытаний	Результаты испытаний образцов											
		Контрольных					Число циклов замораживания и оттаивания	Основных				Заключение о результатах испытаний	
		Масса образцов в насыщенном состоянии до испытаний, г	Прочность на сжатие насыщенных образцов, МПа	Средняя прочность на сжатие насыщенных образцов в серии, МПа	Нижняя граница доверительного интервала X_{min}	Нижняя граница доверительного интервала с коэффициентом $0,9 X_{min}$		Масса образцов после испытаний, г	Прочность на сжатие образцов после испытаний, МПа	Средняя прочность на сжатие после испытаний, МПа	Нижняя граница доверительного интервала X_{min}		Изменение массы, %
ИЗ-П от 10.04.19	Третий ускоренный	2457 2421 2454 2424 2437 <u>2477</u> ср = 2445,0	177,9 178,3 173,0 174,7 170,1 169,6	173,9	164,99	148,49	155	2465 2445 2420 2429 2431 <u>2451</u> ср= 2440,2	168,2 165,6 171,1 165,8 169,1 171,6	168,4	161,20	- 0,21	F₂ 800

Примечание: Образцы считаются выдержавшими испытание на морозостойкость, если соблюдается соотношение $X_{\min} // \geq 0,9 X_{\min}$

Оценка потери прочности на сжатие и массы проводилась на образцах-кубах размером $100 \times 100 \times 100$ мм. Перед началом испытания были определены прочность на сжатие и масса контрольных образцов в насыщенном состоянии, относительно которых в дальнейшем и оценивались изменения соответствующих характеристик.

По результатам испытаний, представленным в табл. 4.6, выявлено, что снижение прочности на сжатие после 155 циклов замораживания-оттаивания составило 3,2% (с $R_{нач.} = 173,9$ МПа до $R_{155 \text{ циклов}} = 168,4$ МПа), при этом снижение показателей массы образцов практически не наблюдалось, т. е. находилось в пределах статистической погрешности. Проникновение хлоридов в структуру бетона практически не наблюдается и составляет не более 5 мм вглубь от поверхности образцов.

Анализ полученных результатов свидетельствует о способности материала выдержать не менее 155 циклов замораживания-оттаивания в 5%-ном водном растворе хлорида натрия, что, согласно ГОСТ 10060-2012, соответствует марке бетона по морозостойкости $F_2 800$ и значительно выше требований, предъявляемых обычно к бетону конструкций для дорожных сооружений в России ($F_2 300$).

Выводы

Строительному производству и проектированию предоставлен самоуплотняющийся сверхвысокопрочный сталефибробетон со следующими характеристиками:

- прочность при осевом сжатии R_f – 120-180 МПа;
- прочность при осевом сжатии R_{fbt} – 100-160 МПа;
- прочность при осевом растяжении R_{fbt} – 8-10 МПа;
- прочность на растяжение при изгибе R_{fbtb} – 18-25 МПа;
- начальный модуль упругости E_{fb} – 43-60 ГПа;
- динамический модуль упругости E_{fd} – 46-60 ГПа;
- марка по морозостойкости – не ниже $F_2 800$.

Предлагаемый вид бетона отличается улучшенными упруго-пластическими характеристиками, с повышенной долговечностью по сравнению с традиционными бетонами, позволяя проектировать и возводить ажурные несущие конструкции гражданских, транспортных, промышленных, специальных и уникальных сооружений.

Полученные закономерности изменения прочностных и упруго-пластических свойств в зависимости от технологических факторов могут быть использованы при обосновании нормативных характеристик, необходимых для проектирования и возведения конструкций и сооружений.

Наиболее эффективными областями применения СВФБ представляются транспортные сооружения, специальные конструкции и сооружения, подвергаемые динамическим нагрузкам, а также предназначенные для радиационной защиты. Особенно эффективно указанный материал может зарекомендовать себя в конструкциях большепролетных строений и в сооружениях с консольными элементами, т. е. в конструкциях, работающих на изгиб.

Улучшенные характеристиками долговечности СВФБ дают возможность применения этого материала для изготовления конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, что существенно увеличит межремонтный период при эксплуатации сооружений.

Библиографический список

1. AFGC Recommendations on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC). Revised edition, June 2013. France, AFGC's Scientific and Technical Committee.
2. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Batrakov V.G.* A New Method for Producing Flowable and Stabilized Pastes of Silica Fume, and Concrete Properties // Fifth CANMET / ACI, International conference on Fly-Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. June 1995, Milwaukee, USA. Pp. 373-389.
3. Maintenance Construction Securite – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Recommendation: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cement-based composites (UHPFRC). Construction material, dimensioning and application. MCS-EPFL Lausanne, Switzerland, Mai 2016. Pp.37.
4. *Malhotra V.V.* Innovative Applications of Superplasticizers in Concrete – A Review // CANMET / ACI Symposium on Advances in Concrete Science Techn., Rome, oct. 7-10, 1997, Proceedings, Pp. 271-314.
5. *Sovjak R., Maca R., Imlauf T.* Effect of fiber length on the fracture energy of UHPFRC // www.sciencedirect.com, Procedia Engineering 193, (2017). Pp. 74-79.
6. *Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С. [и др.]*. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // Высотные здания. 2007. №5. С. 94-101.
7. *Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В.* Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6-10.
8. *Каприелов С.С., Чилин И.А.* Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. №7. С. 28-30.
9. Патент РФ 2662168 «Бетонная смесь». Дата регистрации в Гос. реестре изобретений РФ: 24.07.2018.
10. Стандарт Франции NF P 18-470 Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Spécification, performance, production et conformité, AFNOR, Paris, 2016.
11. Стандарт Франции NF P 18-710 Calcul des structures en béton – Règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), AFNOR, Paris, 2016.

Автор

Игорь Анатольевич ЧИЛИН, инженер лаборатории химических добавок и модифицированных бетонов НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Igor CHILIN, engineer of the Laboratory of chemical additives and modified concrete, NIIZHB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: niizhb16@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-06