



УДК 620.22-022.532

НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЙ СТАЛЕФИБРОБЕТОН ДЛЯ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова

NANOMODIFIED STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE FOR BRIDGE CONSTRUCTIONS

Y.V. Pukharenko, I.U. Aubakirova

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния стальных волокон «Челябинка» на формирование структуры и важнейшие свойства сталефибробетона. Установлена эффективность наномодификаторов для усиления активной структурообразующей роли волокон, особенно в процессе формирования плотных и прочных межчастичных границ раздела, что способствует увеличению прочности и эксплуатационной надежности цементных бетонов. Впервые проведены исследования морозостойкости и водонепроницаемости сталефибробетона с учетом работы в условиях циклических нагрузок.

Ключевые слова: мостовые конструкции; сталефибробетон; наномодифицирование; прочность; морозостойкость; водонепроницаемость; циклические нагрузки.

Abstract: The results of experimental studies for the effect of «Chelyabinka» steel fibers on the formation of structure and essential properties of steel fiber reinforced concrete. The efficiency of nanomodifiers to enhance the active role of structure-forming fibers, especially in the formation of dense and strong interparticle boundaries that increases the strength and the operational reliability of the cement-based concrete. Firstly the research of frost resistance and water impermeability of steel fiber reinforced concrete with considering work in conditions of cyclic loads were conducted.

Key words: bridge construction; steel fiber concrete; system hardening; strength; frost resistance; water resistance; cyclic loads.

Железобетонные мостовые конструкции широко используются в современном строительстве, как в виде монолитных сооружений, так и сборных изделий. Отличительной особенностью таких элементов является высокая надежность в эксплуатации и долговечность, что определяется составом бетона, режимами твердения, качеством укладки и уплотнения бетонной смеси.

Целью работы являлось получение состава сталефибробетона с прочностью на растяжение при изгибе $R_{\text{ри}} \geq 7,0$ МПа, маркой по морозостойкости $F_2 \geq 300$ и маркой по водонепроницаемости $W \geq 12$ при подвижности бетонной смеси $ОК = 8 \dots 10$ см и расходе фибры «Челябинка» не более 90 кг/м^3 .

Оптимизационные исследования проводились применительно к базовому составу, установленному в 1998-2002 г.г. ЮУрГУ и ОАО «ЦНИИС», с учетом замены цемента ПЦ500Д-20 на бездобавочный той же марки. Расход компонентов на 1 м^3 бетонной смеси базового состава указан в табл. 1.

В условиях жестко фиксированного расхода фибры для достижения заданного результата исследовался ряд факторов, обычно оказывающих заметное влияние на прочность цементных бетонов, в том числе, и фиброармированных:

- влияние концентрации цементного камня путем изменения расходов цемента и воды в пределах обеспечения заданной подвижности;
- влияние соотношения между мелким и крупным заполнителем в составе бетонной матрицы;

- влияние тонкодисперсных наполнителей в составе сырьевой смеси;
- влияние более эффективных современных суперпластификаторов бетонной смеси поликарбоксилатного типа, в том числе наномодифицированных.

Комплекс проведенных на кафедре ТСМиМ СПбГАСУ исследований [1-5] показал, что из всех перечисленных факторов наиболее значимым и оказывающим позитивное влияние на физико-механические характеристики сталефибробетона базового состава является наноструктурное модифицирование смеси, которое осуществляется путем введения в фибробетонную смесь базового состава вместо стандартных суперпластификаторов добавки, модифицированной углеродными наночастицами фуллероидного типа. При этом, в качестве наномодификатора использовался «Концентрат модификатора добавок к бетонным смесям» (ТУ5745-001-76173097-2005). Концентрат представляет собой водную суспензию нанодисперсных форм неорганических и органических соединений и предназначен для улучшения формовочных свойств бетонных смесей, прочности и эксплуатационной надежности бетона строительных конструкций зданий и сооружений различного назначения.

В процессе приготовления наномодифицированных фибробетонных смесей в заводских условиях добавка и концентрат модификатора смешивались в пропорции Добавка: Концентрат - 100:1. Перемешивание производилось в емкостях объемом 1 м³ при помощи погружного насоса в течение 1,0-1,5 ч. Компоненты бетонной смеси дозировались в соответствии с разработанным составом. В начале в бетоносмеситель загружали песок и щебень, затем добавку и воду и перемешивали компоненты не менее 30 сек. Затем добавляли расчетное количество цемента и перемешивание продолжалось еще 60 сек. Фибра подавалась в готовую бетонную смесь и перемешивание продолжалось еще 60 сек до полной однородности.

Результаты сравнительных испытаний прочности образцов сталефибробетона базового и оптимизированного составов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Состав и свойства сталефибробетона с наномодифицированной добавкой FK-63.30

№ п/п	Характеристика компонентов и смеси	Расход компонентов, кг/м ³	Осадка конуса бет. смеси, см	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность в возрасте 28 суток, МПа	
					при изгибе	При сжатии
1	Базовый состав: - цемент ПЦ 500 Д0 - песок (Мкр 2,2) - щебень гранитный (фр. 5-20) - фибра «Челябинка» - вода при В/Ц = 0,37 - суперпластификатор С-3 (0,5 % Ц) - СНВ (0,015%Ц)	420 598 1191 90 155 2,1 0,063	3..5	2465	5,6	62,3
2	Оптимизированный состав: - цемент ПЦ 500 Д0 - песок (Мкр 2,2) - щебень гранитный (фр. 5-20) - фибра «Челябинка» - вода при В/Ц = 0,39 - суперпластификатор FK-63.30 наномодифицированный (0,4% Ц)	420 600 1190 90 164 1,68	9...11	2480	7,5	65,8

Таблица 2 – Состав и свойства сталефибробетона с наномодифицированной добавкой Stachement 2061

№ пп	Характеристика компонентов и смеси	Расход компонентов, кг/м ³	Осадка конуса бет. смеси, см	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность в возрасте 28 суток, МПа	
					при изгибе	При сжатии
1	Базовый состав: - цемент ПЦ 500 Д0 - песок (Мкр 2,2) - щебень гранитный (фр. 5-20) - фибра «Челябинка» - вода при В/Ц = 0,37 - суперпластификатор С-3 (0,5 % Ц) - СНВ (0,015%Ц)	420 598 1191 90 155 2,1 0,063	3...5	2460	6,1	59,7
2	Оптимизированный состав: - цемент ПЦ 500 Д0 - песок (Мкр 2,2) - щебень гранитный (фр. 5-20) - фибра «Челябинка» - вода при В/Ц = 0,39 - суперпластификатор Stachement 2061 наномодифицированный (0,4% Ц)	420 600 1190 90 164 1,68	9...11	2475	7,1	60,6

Из таблиц 1 и 2 следует, что наноструктурное модифицирование сталефибробетонной смеси способствует получению материала с заданной прочностью при использовании базового состава.

После твердения в течение 28 суток в нормальных условиях образцы подвергались испытаниям на морозостойкость и водонепроницаемость. В работе использовались ускоренные испытания определения морозостойкости dilatометрическим методом и водонепроницаемости по сопротивлению бетона прониканию воздуха. По окончании работы на оптимизированных составах сталефибробетона предполагается проведение стандартных испытаний.

Результаты испытаний на морозостойкость приведены в табл.3.

Таблица 3 – Морозостойкость сталефибробетона

Вид бетона	Относительное увеличение разности объемной деформации бетонного и стандартного образцов $\theta \cdot 10^{-3}$		Марка по морозостойкости
	отдельных образцов	среднее значение	
Сталефибробетон базового состава	0,158	0,158	F ₁ 600 F ₂ 300
	0,166		
	0,150		
Сталефибробетон оптимизированного состава	0,122	0,122	F ₁ 600 F ₂ 300
	0,118		
	0,128		

Из таблицы 3 следует, что образцы базового и оптимизированного состава соответствуют марке F 600 по первому базовому методу и марке F 300 по второму базовому методу.

В таблице 4 приведены результаты испытаний на водонепроницаемость.

Таблица 4 – Водонепроницаемость сталефибробетона

Вид бетона	Сопротивление бетона прониканию воздуха $m_c, c/cm^3$		Марка по водонепроницаемости
	единичные значения	среднее значение	
Сталефибробетон базового состава	28,5	40,6	W14
	33,6		
	39,8		
	41,4		
	45,9		
	55,3		
Сталефибробетон оптимизированного состава	19,5	41,8	W14
	27,3		
	34,4		
	49,1		
	63,3		
	85,4		

Из таблицы 4 следует, что образцы базового и оптимизированного состава соответствуют марке W14 по водонепроницаемости.

Испытание сталефибробетона базового и оптимизированного состава на выносливость в условиях циклических нагрузок проводили на образцах-призмах размерами, мм:

- 100 x 100 x 400 - при оценке прочности в условиях циклических нагрузок;
- 100 x 100 x 100 – при исследовании морозостойкости (образцы вырезались из призм размером 100 x 100 x 400 мм после приложения циклической нагрузки);
- 150 x 150 x 600 – при определении водонепроницаемости после приложения циклической нагрузки.

Призменная прочность бетона определялась по ГОСТ 24452-80 до испытаний на выносливость и составила 46,7 МПа для сталефибробетона базового состава и 50,4 МПа для сталефибробетона оптимизированного состава. В виду того, что значения прочности оказались близкими, в дальнейшем при расчете уровня нагружения при циклических воздействиях было принято ее усредненное значение, равное 50 МПа.

ГОСТ 24545-81 «Бетоны. Методы испытаний на выносливость» устанавливает методы испытаний путем нагружения образцов стандартных размеров многократно повторяющейся осевой сжимающей нагрузкой. При этом, по одному из вариантов результатом испытаний является число циклов до разрушения образца.

Испытание на выносливость проводили при постоянных значениях частоты циклов многократно повторного нагружения $f = 6$ Гц и коэффициента асимметрии цикла $\rho_6 = 0,1$. В данных условиях выносливость сталефибробетона базового и оптимизированного состава при уровне нагружения, равном $0,9 R_{np}$ составила 3,0 млн циклов.

С учетом полученных данных впервые были исследованы морозостойкость и водонепроницаемость сталефибробетона с учетом работы в условиях циклических нагрузок. При этом были приняты следующие параметры приложения циклической нагрузки:

- частота циклов многократно повторного нагружения $f = 6$ Гц;
- коэффициент асимметрии цикла $\rho_6 = 0,1$;
- число циклов многократно повторного нагружения (база испытаний) 3,0 млн циклов для сталефибробетона обоих исследуемых составов.

В ходе исследований последовательно проводили испытания образцов на четырех уровнях нагружения, равных 0,6; 0,7 и 0,8 от разрушающей нагрузки. Возраст бетона к началу испытаний составлял 28 сут.

После приложения циклической нагрузки образцы испытывались на морозостойкость и водонепроницаемость.

Таблица 5 – Морозостойкость сталефибробетона с учетом работы в условиях циклических нагрузок

Вид бетона	Относительное увеличение разности объемной деформации бетонного и стандартного образцов $\theta \cdot 10^{-3}$ (средние значения) при уровнях нагружения (доля от R_{np})				Марка по морозостойкости при уровнях нагружения (доля от R_{np})			
	0	0,6	0,7	0,8	0	0,6	0,7	0,8
Сталефибробетон базового состава	0,176	0,195	0,224	0,232	F ₁ 600 F ₂ 300	F ₁ 600 F ₂ 300	F ₁ 500 F ₂ 200	F ₁ 400 F ₂ 200
Сталефибробетон оптимизированного состава	0,124	0,136	0,147	0,211	F ₁ 600 F ₂ 300	F ₁ 600 F ₂ 300	F ₁ 600 F ₂ 300	F ₁ 500 F ₂ 200

Из таблицы 5 следует, что образцы сталефибробетона оптимизированного состава соответствуют марке F 600 по первому базовому методу и марке F 300 по второму базовому методу при уровне нагружения в пределах до 0,7 R_{np} включительно.

В таблице 6 приведены результаты испытаний на водонепроницаемость сталефибробетона с учетом работы в условиях циклических нагрузок.

Таблица 6 – Водонепроницаемость сталефибробетона с учетом работы в условиях циклических нагрузок

Вид бетона	Сопротивление бетона прониканию воздуха (средние значения) m_c , с/см ³ при уровнях нагружения (доля от R_{np})				Марка по водонепроницаемости при уровнях нагружения (доля от R_{np})			
	0	0,6	0,7	0,8	0	0,6	0,7	0,8
Бетон	41,6	15,7	7,8	3,9	W 14	W 10	W 6	W 2
Сталефибробетон оптимизированного состава	44,8	23,5	11,3	4,1	W 16	W 12	W 8	W 2

Из таблицы 6 следует, что образцы сталефибробетона оптимизированного состава соответствуют требуемой марке по водонепроницаемости (W 12) при циклических нагрузках до уровня нагружения в пределах до 0,6 R_{np} .

В таблице 7 представлены сводные данные по результатам всех проведенных исследований.

Таблица 7 – Составы смесей и результаты сравнительных испытаний сталефибробетона на фибре «Челябинка»

№ пп	Наименование показателей	Сталефибробетон базового состава	Сталефибробетон оптимизированного состава
1	Расход компонентов на 1 м ³ бетонной смеси, кг: - цемент ПЦ 500 Д0 - песок (Мкр 2,2) - щебень гранитный (фр. 5-20) - фибра «Челябинка» - вода при В/Ц = 0,37 ... 0,39 - суперпластификатор С-3 (0,5 % Ц) - СНВ (0,015%Ц) - суперпластификатор FK – 63.30 (или Stachement 2061.1») наномодифицированный (0,4% Ц)	420 598 1191 90 155 2,1 0,063 -	420 600 1190 90 164 - - 1,68
2	Осадка конуса бетонной смеси, см	3...5	9...11
3	Средняя плотность, кг/м ³	2460...2465	2475...2480
4	Предел прочности, МПа: - при сжатии - при изгибе	59,7...62,3 5,6...6,1	60,6...65,8 7,1...7,5
5	Призменная прочность, МПа	46,7	50,4
6	Марка по морозостойкости	F ₁ 600 F ₂ 300	F ₁ 600 F ₂ 300
7	Марка по водонепроницаемости	W 14	W 14
8	Выносливость по ГОСТ 24545-81 при уровне нагружения 0,9 R _{np} (f= 6 Гц и ρ _б = 0,1), млн цикл	3,0	3,0
9	Марка по морозостойкости после испытания циклической нагрузкой по ГОСТ 24545-81 (база испытаний 3,0 млн цикл) при уровне нагружения: 0,6 R _{np} 0,7 R _{np} 0,8 R _{np}	F ₁ 600 / F ₂ 300 F ₁ 500 / F ₂ 200 F ₁ 400 / F ₂ 200	F ₁ 600 / F ₂ 300 F ₁ 600 / F ₂ 300 F ₁ 500 / F ₂ 200
10	Марка по водонепроницаемости после испытания циклической нагрузкой по ГОСТ 24545-81 (база испытаний 3,0 млн цикл) при уровне нагружения: 0,6 R _{np} 0,7 R _{np} 0,8 R _{np}	W 12 W 8 W 2	W 12 W 8 W 2

Таким образом, в результате проведенных исследований получен сталефибробетон с высокими эксплуатационными характеристиками для мостовых конструкций (W≥12; F≥300 в солях; прочность на растяжение при изгибе R_{btb} ≥ 7МПа; марка по подвижности – П3). Разработанный состав сталефибробетона предусматривает применение принципов наномодифицирования для повышения прочности, морозостойкости, водонепроницаемости композита.

Впервые проведены исследования морозостойкости и водонепроницаемости сталефибробетона с учетом работы в условиях циклических нагрузок. Испытания показали, что



образцы сталефибробетона оптимизированного состава соответствуют марке F 600 по первому базовому методу и марке F 300 по второму базовому методу при уровне нагружения в пределах до $0,7 R_{пр}$ включительно. Водонепроницаемость сталефибробетона исследуемых составов соответствует марке W 12 при циклических нагрузках до уровня нагружения в пределах до $0,6 R_{пр}$.

С учетом полученных результатов разработан технологический регламент производства наномодифицированных сталефибробетонных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальмаков М.Д., Пухаренко Ю.В. Нанокomпозиционное материаловедение // Вестник гражданских инженеров, 2005. № 3(4). С. 53–57
2. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем // Современные проблемы строительного материаловедения и технологии: Материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве», кн.2. Воронеж: ВГАСУ, 2008. С. 424–429.
3. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И.У., Скобликов В.А. и др. Применение наносистем при получении сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров, 2011. № 3 (28). С. 77–81.
4. Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю. Высокопрочный сталефибробетон // Промышленное и гражданское строительство, 2007. № 9. С. 40–41
5. Ковалева А.Ю., Беляева Ж.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей // Популярное бетоноведение, 2008. №3(23). С. 28–29.

REFERENCES

1. Balmakov M.D., Pukharenko Y.V. *Nanokompozicionnoe materialovedenie* [Nanocomposite science] *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2005. No 3(4), pp. 53-57.
2. Pukharenko Y.V., Aubakirova, I. U., Nikitin V.A, Staroverov V.D. *Struktura i svoystva nanomodifitsirovannykh tsementnykh system* [Structure and properties of nanomodified cement systems]. *Sovremennyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya i tekhnologii: materialy mezhdunarodnogo kongressa «Nauka I innovatsii v stroitel'stve»*. V. 2, Voronezh, VGASU Publ., 2008, pp. 424-429.
3. Pukharenko Y. V., Aubakirova I.U., Skoblikov V.A. i dr. *Primeneniye nanosistem pri poluchenii stalefibrobetona* [Application of nanosystems in obtaining fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2011. No 3 (28), pp. 77-81
4. Pukharenko Y.V, Golubev V.Y. *Visokoprochniy stalefibrobeton* [High-strength steel fiber reinforced concrete]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*, 2007. No 9, pp. 40-41
5. Kovaleva A.Y., Beliaeva J.V., Aubakirova I.U, Staroverov V.D. *Opit promishlennogo primeneniya nanomodifitsirovannykh betonnykh smesei* [Experience of industrial applications of nanomodified concrete mixtures]. *Populiarnoe betonovedenie*, 2008. No 3(23), pp. 28-29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пухаренко Юрий Владимирович

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тех-



нологии строительных материалов и метрологии, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук.

E-mail: tsik@spbgasu.ru

Pukhareno Yury Vladimirovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department Technology of Building materials and Metrology, Corresponding member of the Russian academy of architecture and building sciences

E-mail: tsik@spbgasu.ru

Аубакирова Ирина Утарбаевна

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии

E-mail: centeririna@spbgasu.ru

Aubakirova Irina Utarbaevna

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia, PhD in Engineering, Associate Professor of Department Technology of Building materials and Metrology.

E-mail: centeririna@spbgasu.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:
190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, СПбГАСУ, каб. 307с. Пухаренко Ю.В.
8(812) 316-78-72