

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Физико-механические и технологические свойства сталефибробетона, особенности применения и перспективы развития сталефибробетонных конструкций

Physical-mechanical and technological properties of steel fiber concrete. Peculiarities of application and development prospects of steel fiber concrete constructions

Блещик Н.П. доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
Коваль И.В. кандидат технических наук, заведующий отделом
технологии бетона и растворов РУП «Институт БелНИИС»

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния содержания стальной фибры в бетоне, ее геометрических и механических свойств стальной фибры на характеристики удобоукладываемости бетонной смеси и прочности сталефибробетона. Приведены основные положения разрабатываемых ТНПА, технологии приготовления сталефибробетона, изготовление сборных и возведение монолитных сталефибробетонных конструкций

ABSTRACT

The results of experimental and theoretical researches of the influence of geometrical and mechanical properties and content of steel fiber in the concrete on the placeability and strength of steel fiber concrete are shown. The basic points of working out TNLAs, technologies of steel fiber concrete, production of precast and erection of cast-in-situ steel fiber concrete constructions are represented.

ВВЕДЕНИЕ

Сталефибробетон один из новых видов бетона, обеспечивающий повышение эффективности железобетонных изделий и конструкций за счет увеличения прочности бетона на растяжение при изгибе, предельной сжимаемости, трещиностойкости, водонепроницаемости, морозостойкости и коррозионной стойкости, термо- и огнестойкости, сопротивления истираемости. В то же время сталефибробетон позволяет существенно снизить трудозатраты на арматурные работы, повысить степень механизации бетонных работ и расширить область применения эффективных конструктивных решений зданий и сооружений.

Зарубежный опыт применения сталефибробетона в строительстве зданий и сооружений подтвердил эффективность его применения при возведении монолитных полов промышленных зданий, отделки тоннелей метро, взлетно-посадочных полос аэродромов, автомобильных дорог, резервуаров и бассейнов, банковских хранилищ, взрывозащитных фортификационных сооружений. В производстве сборных железобетонных изделий сталефибробетон находит применение при изготовлении напорных и безнапорных труб, различных изделий для возведения конструкций метро, элементов стеновых панелей и плит перекрытий, железнодорожных шпал, дорожных плит, бортовых элементов дорог, малых архитектурных форм и других эффективных изделий.

В Республике Беларусь сталефибробетон пока имеет ограниченное применение при возведении монолитных полов и дорожных покрытий, а также отдельных сборных изделий. Выпуск стальной фибры в республике организован на предприятиях РУП «БМЗ» и ОАО «Танис».

Проектирование и изготовление сталефибробетонных конструкций осуществляется по предварительным стандартам и отдельным рекомендациям. В Республике Беларусь эти работы в основном осуществляются по «Рекомендациям по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ» [1] при научно-техническом сопровождении РУП «Институт БелНИИС». Срок действия Рекомендаций истекает 29.07.2012г. Кроме стальной фибры РУП «БМЗ» в республике также активно применяется фрезерованная фибра ЗАО «Курганстальмост» по Рекомендациям [2].

Указанные Рекомендации разработаны РУП «Институт БелНИИС» на основе результатов исследований технологических и физико-механических свойств сталефибробетона, прочностных и деформативных свойств сжатых и изгибаемых сталефибробетонных конструкций, выполненных Отделом технологии бетона и растворов под руководством авторов статьи и ведущего научного сотрудника отдела кандидата технических наук Н.А. Рака.

В статье представлены основные положения результатов исследований, экспериментально-теоретические зависимости физико-механических и технологических свойств сталефибробетона, используемых при назначении составов сталефибробетона и разработке технологических режимов производства сталефибробетонных работ. Отмечены направления дальнейших исследований с целью уточнения отдельных расчетных положений, необходимых для включения в разрабатываемые ТНПА.

1. ВЛИЯНИЕ ВИДА, ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СОДЕРЖАНИЯ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ В БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Предприятиями РУП «БМЗ» и ОАО «Танис» выпускается – проволочная, прямая, анкерная и волновая фибра диаметром 0,3...1,1 мм длиной 12...60 мм по ТУ ВУ 400074854.628-2009 и ТУ РБ 400518274-2003 соответственно. Российское предприятие ЗАО «Курганстальмост» производит фрезерованную стальную фибру по техническим условиям ТУ 0882-193-46 854090-2005. Физико-механические свойства стальной фибры представлены в [1, 2]. РУП «Институт БелНИИС» по заданию указанных предприятий выполняет комплекс исследований влияния свойств и содержания всех видов стальной фибры на физико-механические свойства сталефибробетона и технологические свойства бетонной смеси – показатели удобоукладываемости, сохранение удобоукладываемости в процессе транспортирования и укладки, режимы приготовления в производственных условиях и строительной площадке.

В качестве факторов, оказывающих влияние на технологические свойства бетонной смеси и бетона принимались объемное содержание фибры в бетоне, вид фибры, ее диаметр и длина, крупность заполнителя, водовяжущее отношение бетона, способы приготовления бетонной смеси. Методика исследований принималась в соответствии с требованиями действующих в Республике Беларусь стандартов, как правило, гармонизированных с европейскими стандартами.

Характеристика геометрических параметров исследуемой проволочной фибры представлена в таблице 1.

Таблица 1- Характеристика геометрических параметров исследуемой проволочной фибры

№ п/п	Вид фибры	Диаметр, d, мм	Длина, L, мм	Удельная поверхность, м ² /кг
1	прямая	0,40	12,0	1,282
2	прямая	0,30	12,0	1,942
3	анкерная	1,10	60,0	0,466
4	анкерная	1,00	59,5	0,513
5	анкерная	0,80	60,0	0,641
6	анкерная	0,60	28,5	0,855
7	анкерная	0,50	28,5	1,026
8	анкерная	0,38	30,0	1,350
9	волновая	0,30	30,0	1,710
10	волновая	0,70	21,5	0,733
11	волновая	0,50	21,5	1,026
12	волновая	0,20	20,0	2,565

Плотность всех образцов фибры ρ_f составляла 7800 кг/м^3 .

В качестве вяжущих использовались следующие портландцементы:

- ПЦ 500-Д0 ОАО «Красносельскстройматериалы»;
- ПЦ 500-Д0 ПРУП «Белорусский цементный завод»;
- ПЦ 400-Д20ПРУП «Кричевцементошифер».

В качестве заполнителей использовались материалы, характеристики которых приведены в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2 - Характеристики мелкого заполнителя (песка)

Вид заполнителя	Пустотность, %	P, т/м ² плотность	$\rho_{ист}$ т/м ²	S м ² /кг	Гранулометрический состав в %					
					5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
					2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,038
Песок	26	1,91	2,55	7,5	12,5	13,4	20,6	35	16	2,5

Таблица 3 Характеристики крупного заполнителя (щебня) фракции 5-20 мм

Вид заполнителя	Пустотность, %	P, т/м ² плотность	$\rho_{ист}$ т/м ²	Гранулометрический состав в %							
				40	20	10	5	2,5	0,14	0,63	0,315
				20	10	5	2,5	1,25	0,038	0,315	0,14
Щебень 5-20 мм	37,1	1,7	2,68	0,25	18,25	37,25	0,35	0,15	0,23	0,35	0,2

Таблица 4 Характеристики крупного заполнителя (щебня) фракции 5-10 мм

Вид заполнителя	Пустотность, %	P, т/м ² плотность	$\rho_{ист}$ т/м ²	Гранулометрический состав в %						
				20	10	5	2,5	0,14	0,63	0,315
				10	5	2,5	1,25	0,038	0,315	0,14
Щебень 5-10 мм	38,4	1,53	2,8	12,0	78,0	8,05	0,4	0,08	0,15	1,25

В качестве химических добавок применялись суперпластификатор С-3 и гиперпластификатор ГП-1, соответствующих техническим условиям, приведенным [3].

Для выявления влияния указанных выше факторов на показатели удобоукладываемости бетонной смеси был выполнен большой комплекс исследований, в которых определяющие факторы варьировались в следующих пределах:

- объемное содержание фибры μ_{of} изменялось от 0,3 до 3,5%;
- водовяжущее отношение находилось в пределах 0,27...0,67;
- применялись мелкозернистые бетонные смеси и с крупным заполнителем фракций 5...10 мм и 5...20 мм.

Приготовление бетонных смесей осуществлялось при трех вариантах последовательности введения ее составляющих:

вариант А – введение воды и химических добавок после перемешивания всех сухих компонентов;

вариант Б – введение фибры после перемешивания остальных компонентов;

вариант В – традиционный способ перемешивания одновременно всех компонентов смеси.

В таблице 5 представлены результаты исследований влияния содержания прямой фибры ОАО «Танис» диаметром $d_f=0,25$ мм, длиной $L=20$ мм ($L/D=80$) на показатели удобоукладываемости мелкозернистой бетонной смеси с содержанием цемента 350...500 кг/м^3 при начальной подвижности 10...21 см.

Таблица 5 - Влияние состава и вариантов приготовления бетонных смесей на ее показатели удобоукладываемости

Характеристика состава	Объемное содержание фибры, $\mu_{оф}, \%$	Показатели удобоукладываемости бетонной смеси после ее приготовления, ОК (см) (через 6 мин.) варианты приготовления:			Отношение показателей подвижности смеси при различных вариантах приготовления	
		А	Б	В	$ОК_A/ОК_B$	$ОК_B/ОК_B$
Ц-350кг/м ³ В/Ц-0,536	0,0	21	21	21	1,00	1,00
	0,5	20	21	16	1,25	1,31
	1,0	15	17	10	1,50	1,70
	1,5	14	16	4	3,50	4,00
	2,0	7	10	2	3,50	5,00
Ц-350кг/м ³ В/Ц-0,63	0,0	21	21	21	1,00	1,00
	0,5	19	21	14	1,35	1,50
	1,0	18	18	12	1,50	1,50
	1,5	15	16	4	3,75	4,00
	2,0	9	10	1	9,00	10,00
Ц-450кг/м ³ В/Ц-0,54	0,0	10	10	10	1,00	1,00
	0,5	8	8	5	1,60	1,60
	1,0	6	7	3	2,00	2,33
	1,5	4	6	1	4,00	6,00
	2,0	3	4	0	-	-
Ц-350кг/м ³ В/Ц-0,67	0,0	10	10	10	1,00	1,00
	0,5	7	8	4	1,75	2,00
	1,0	7	8	3	2,30	2,67
	1,5	4	6	1	4,00	6,00
	2,0	3	4	-	-	-

Как следует из данных таблицы 5 увеличение содержания фибры значительно снижает показатели подвижности бетонной смеси при всех способах ее приготовления. Наибольшее снижение отмечено при приготовлении по варианту В: при $\mu_{оф} = 2\%$ снижение достигает 20 раз при начальной подвижности без фибры $ОК_н = 21$ см. Наименьшее снижение подвижности смеси наблюдается при приготовлении смеси по варианту Б. При варианте А отмечено незначительное – на 2-3% по сравнению с вариантом Б увеличение снижения подвижности смеси.

На относительное снижение подвижности смеси при постоянном объемном содержании фибры существенно влияют показатели подвижности смеси с нулевым содержанием фибры – $ОК_о$. Например, снижение $ОК_о$ с 21 до 10 см при 1% содержании фибры $d = 0,25$ мм относительный показатель изменения осадки конуса $K_{ок.ф}$ снижается с 0,55...0,85 до 0,4...0,7 при приготовлении смеси соответственно по варианту А и В.

Содержание цемента в бетонной смеси и водовяжущее отношение при прочих равных условиях не оказывает существенного влияния на значения $K_{ок.ф}$.

Примерная зависимость влияния содержания прямой фибры диаметром $d = 0,25$ мм на показатели осадки конуса бетонной смеси с расходом цемента 500 кг/м^3 и $В/Ц = 0,536$ представлена на рисунке 1.

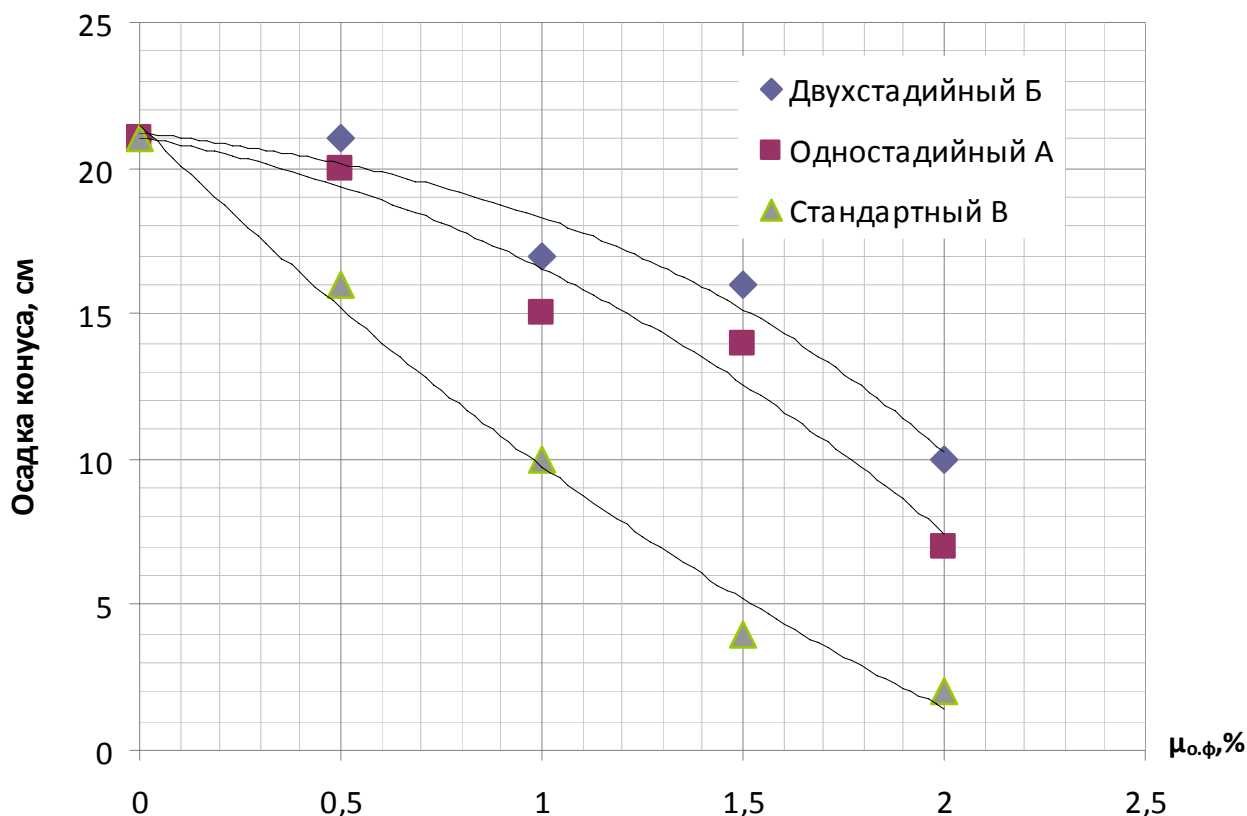


Рисунок 1 – Влияние содержания фибры $\mu_{оф}$ и варианта приготовления на удобоукладываемость сталефибробетонных смесей с расходом цемента 500 кг/м^3 и $V/C=0,536$.

Влияние содержания различной фибры, и вида заполнителей на показатели удобоукладываемости бетонной смеси исследовалось на девяти составах, приведенных в таблице 6.

В таблице 7 и на рисунках 2, 3 приведены данные о влиянии содержания фибры различных видов, диаметров и длины на показатели удобоукладываемости бетонной смеси.

Бетонная смесь приготавливалась по варианту А. Как следует из полученных данных существенное влияние оказывают объемное содержание фибры, ее диаметр и вид. По степени увеличения влияния вида фибры она располагается в следующей последовательности: прямая, анкерная и волновая.

В результате аналитического обобщения результатов исследований влияний многочисленных факторов на показатели удобоукладываемости проволоочной фибры в бетонной смеси предложено оценивать влияние содержания и геометрических параметров фибры - показателем удельной поверхности фибры в объеме бетонной смеси – $S_{у.п.}$.

Таблица 6 - Характеристики составов исследуемых бетонных смесей

Вид материала	Расход материалов в композициях №1-9								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент	510	510	510	510	510	510	510	600	600
Щебень	870	865	860	850	845	875	860	-	-
Песок	790	780	775	770	760	790	775	1465	1435
Фибра	0,0	39	78	117	150	0	78	0	78
Вода	254	254	254	254	254	240	240	270	270

Примечание: в составах №1-5 использовали щебень гранитный фракции 5-10 мм; в составах №6 и №7 – щебень фракции 5-20 мм.

Таблица 7 - Влияние содержания и характеристик фибры на характеристики удобоукладываемости бетонных смесей различных составов

Вид фибры	Характеристика фибры	Составы бетонной смеси №1-5				
		1	2	3	4	5
		Объемное содержание фибры, %				
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
анкерная	1,1/60	16	15	12	8	4
	0,8/60	16	12	9	6	3
	0,3/30	16	7	4,5	1	0 см Ж=10сек
прямая	0,4/12	16	13	10,5	9	8
	0,3/12	16	10	8	7	6
волновая	0,2/22	16	4	1,5	0,5	0 см Ж=15сек

Примечание: данные приведены по показателю жесткости смеси на приборе Красного по СТБ 1545-2005

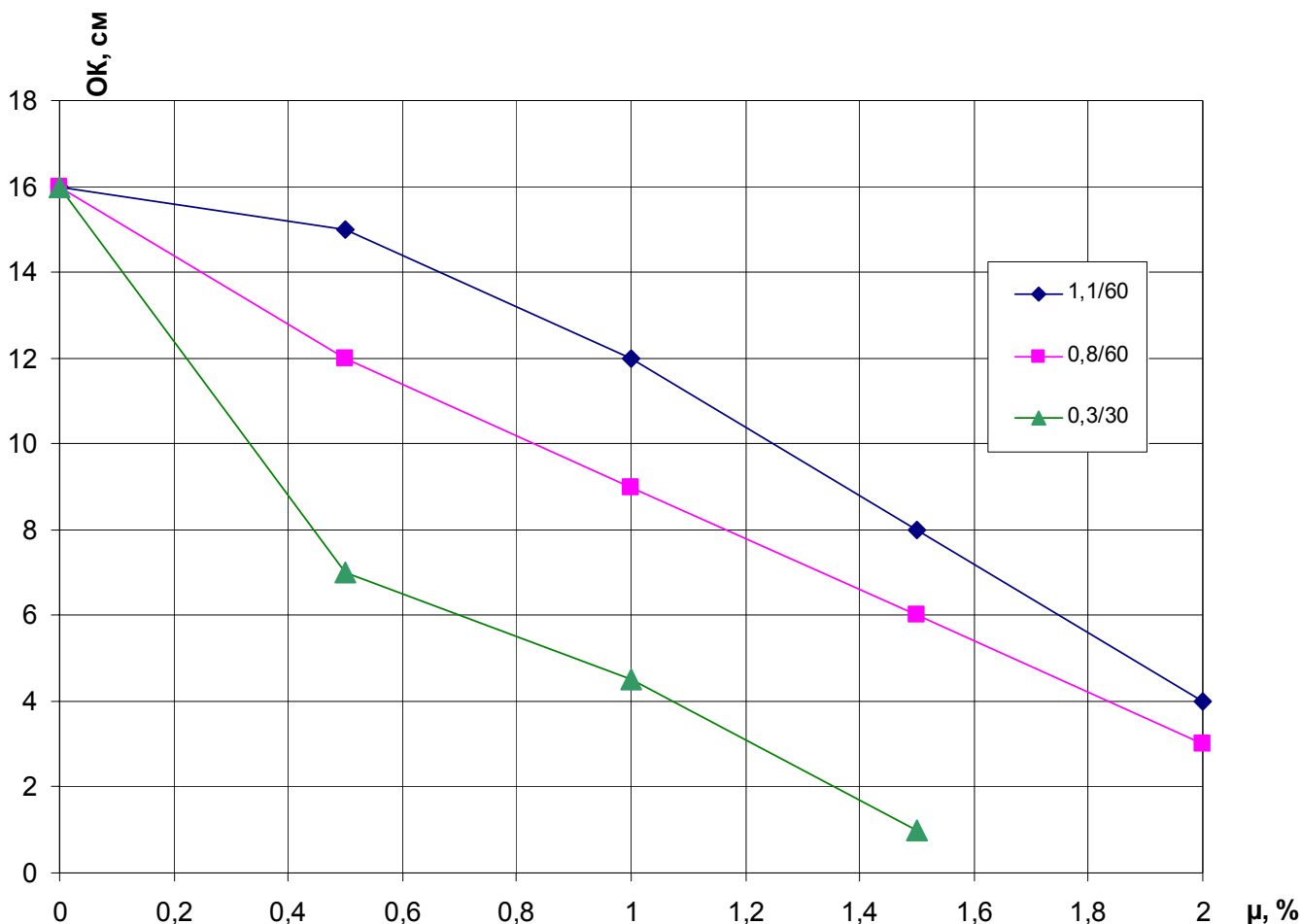


Рисунок 2 - Влияние содержания анкерной фибры на подвижность бетонной смеси, приготовленной по варианту А

По определению этот показатель имеет следующее выражение:

$$S_{y.n.} = \frac{\pi \cdot d_{\phi} \cdot l_{\phi} \cdot \mu_{o.\phi} \cdot 10^{-2}}{\frac{\pi d_{\phi}^2}{4}} = \frac{4}{d_{\phi}} \cdot \mu_{o.\phi} \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (1)$$

где d_{ϕ} и l_{ϕ} – соответственно диаметр и длина фибры, м;

$\mu_{o.\phi}$ – объемное содержание фибры, % равно:

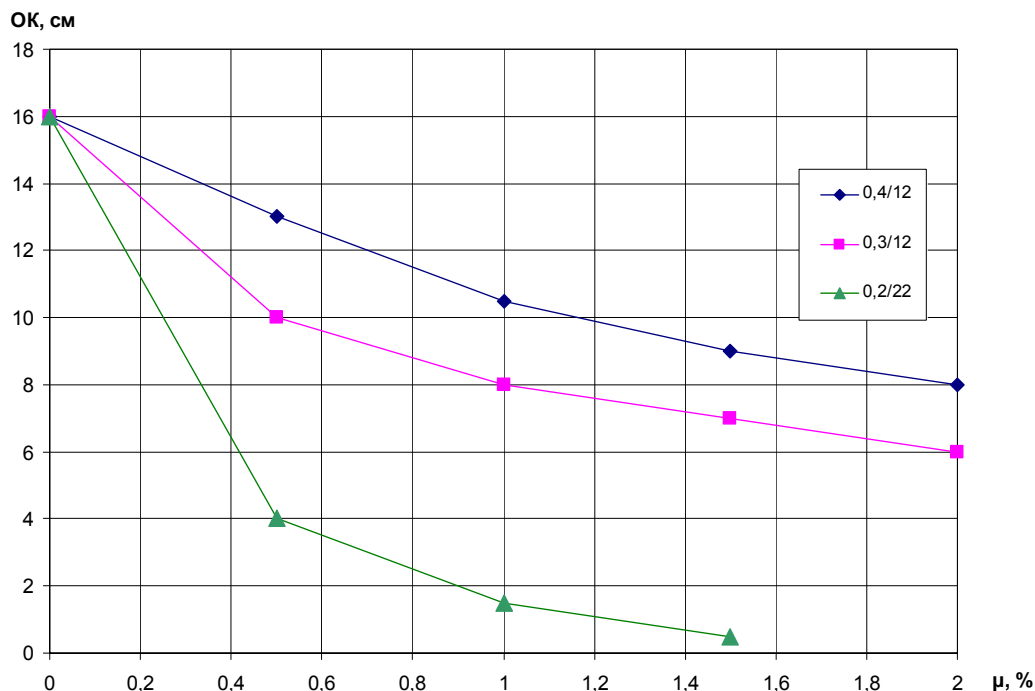


Рисунок 3 - Влияние содержания прямой и волновой фибры на подвижность бетонной смеси, приготовление по варианту А

$$\mu_{о.ф} = \frac{G_{ф} \cdot 100}{\rho_{ф} \cdot V_{ф}}, \quad (2)$$

где $G_{ф}$ – масса фибры, кг;

$\rho_{ф}$ – плотность стальной фибры, равная 7800 кг/м^3 ;

$V_{ф}$ – объем бетона, м^3 .

Влияния содержания различной фибры и других факторов на показатели удобоукладываемости бетонной смеси нами предложено оценивать коэффициентом $K_{ок.ф}$, равном:

$$K_{ок.ф} = \frac{OK_{ф}}{OK_{о}}, \quad (3)$$

где $OK_{ф}$ – осадка конуса сталефибробетонной смеси, см;

$OK_{о}$ – осадка конуса бетонной смеси при нулевом содержании фибры (матрицы).

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено, что $K_{ок.ф}$ зависит от показателя $S_{у.п}$, осадки конуса при нулевом содержании фибры, вида фибр, крупности заполнителя. Графики зависимости отдельных факторов представлены на рисунках 4-7.

В результате обработки комплекса экспериментальных данных с использованием математико-статистических методов получена следующая система математических зависимостей, позволяющая рассчитывать показатели удобоукладываемости сталефибробетонных смесей с учетом указанных выше многочисленных факторов.

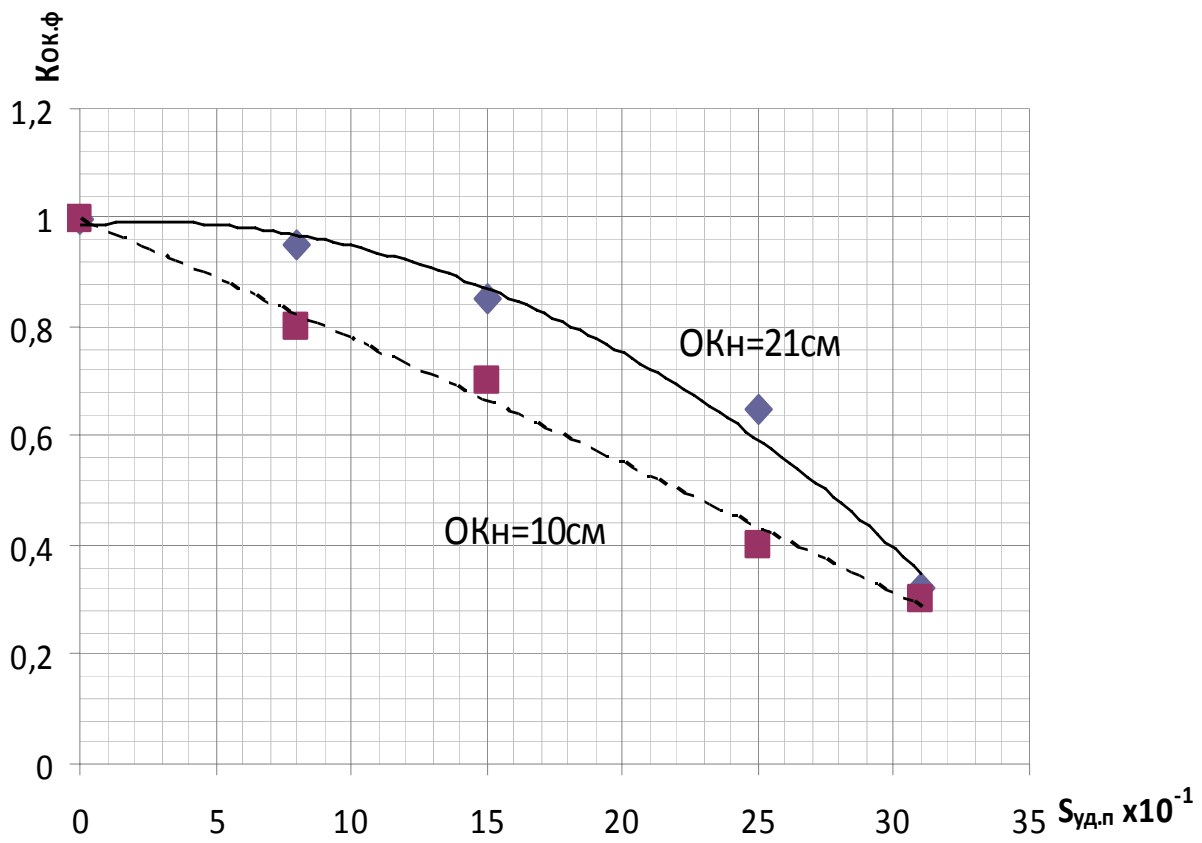


Рисунок 4 Графики зависимости $K_{ок.ф}$ от показателя $S_{уд.п}$ мелкозернистой бетонной смеси, приготовленной по варианту А

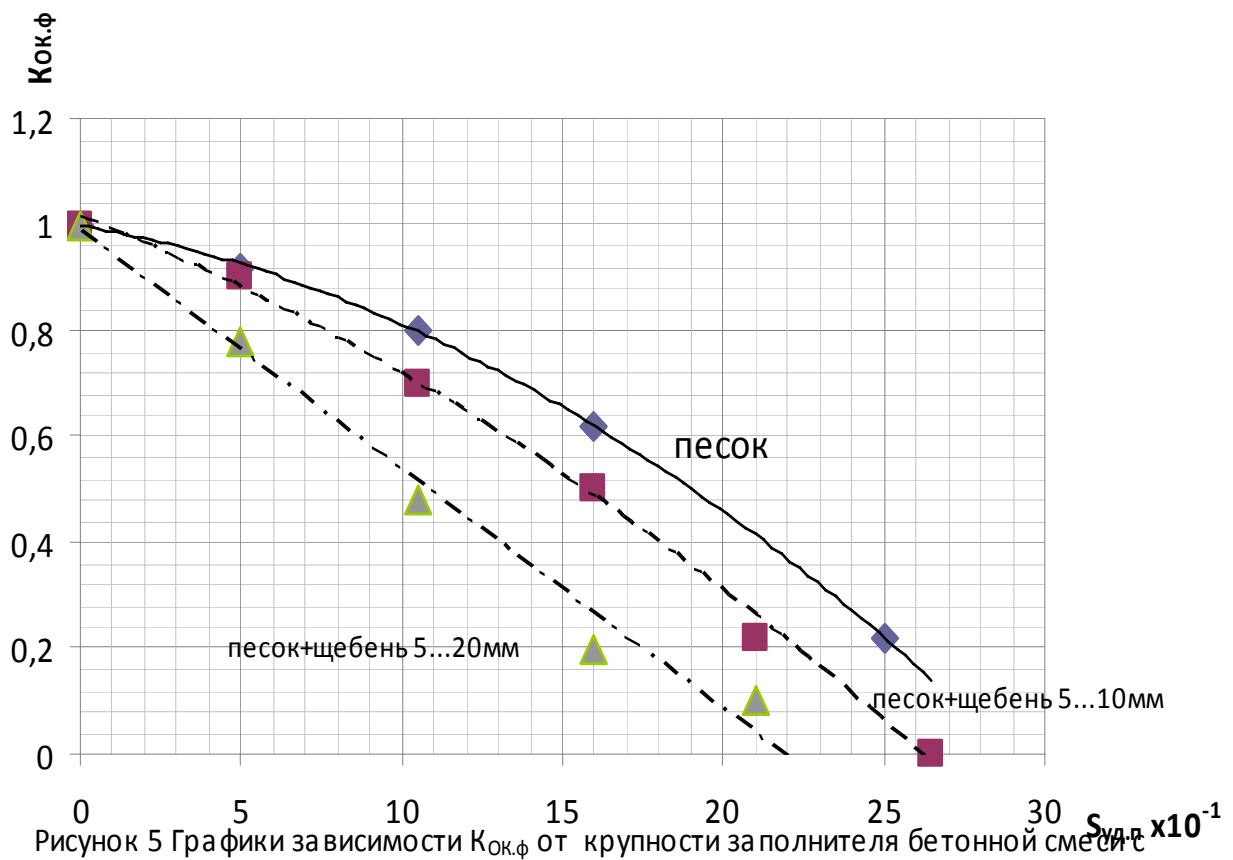


Рисунок 5 Графики зависимости $K_{ок.ф}$ от крупности заполнителя бетонной смеси с начальной подвижностью ОК=12см, приготовленной по варианту А

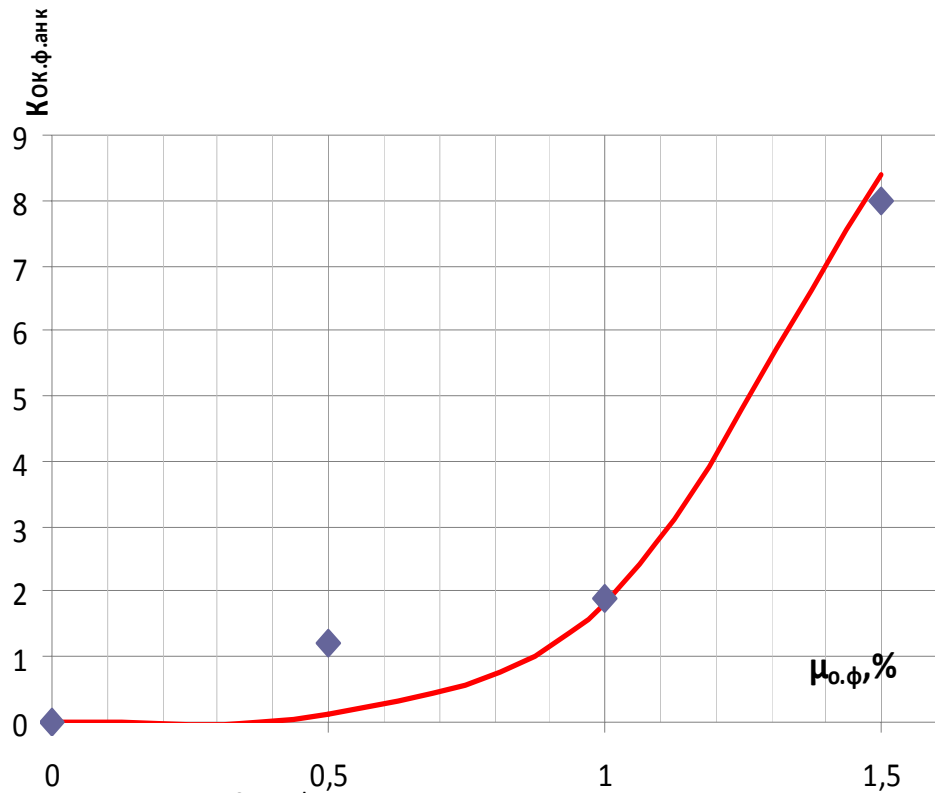


Рисунок 6 График зависимости $K_{ок.ф}$ от вариантов приготовления фибробетонной смеси А и В

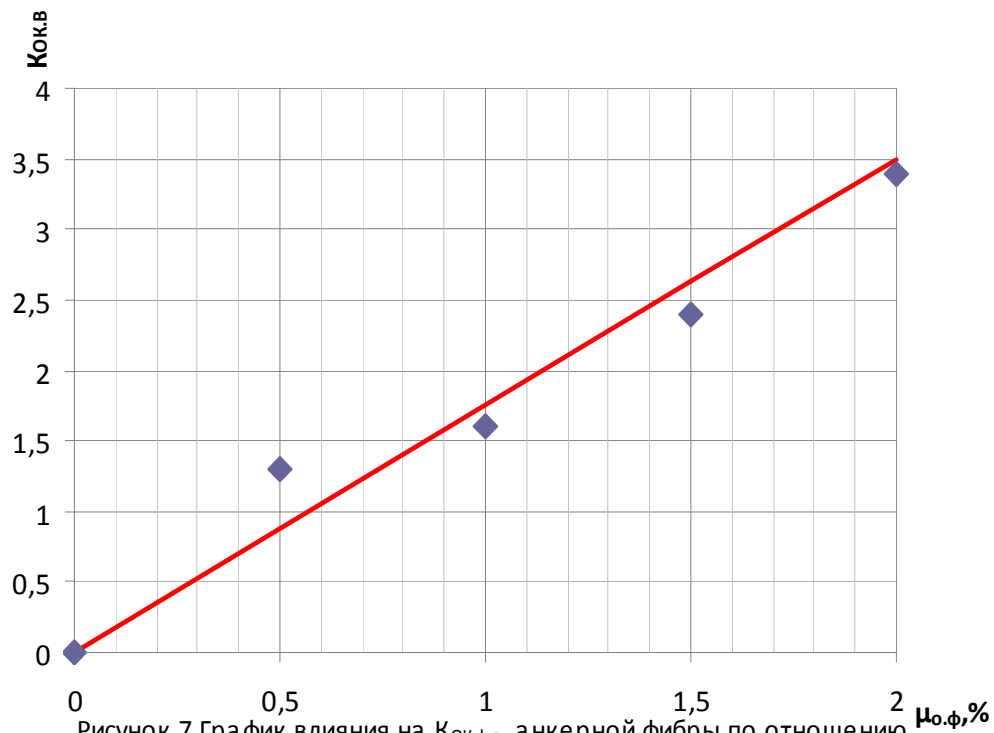


Рисунок 7 График влияния на $K_{ок.ф.в}$ анкерной фибры по отношению к прямой фибре

Из экспериментальных данных, приведенных на рисунке 4, получена следующая математическая модель, учитывающая влияние показателя $S_{y.п}$ и осадки конуса OK_0 при приготовлении мелкозернистой фибробетонной смеси по варианту А и применении прямой фибры:

$$K_{ок.ф.А} = 1 - K \cdot S_{y.п}^n, \quad (4)$$

где параметры K и n для мелкозернистой бетонной смеси получены в виде:

$$n_{м.з.} = 0,65 + 0,055 \cdot OK_0 \quad (5)$$

$$K_{м.з.} = (1,31 - 6,16 \cdot 10^{-2} \cdot OK_0) 10^{-3} \quad (6)$$

При использовании в качестве крупного заполнителя гранитного щебня фракций 5...10 и 5...20 коэффициенты K и n в (4) должны рассчитываться по следующим зависимостям:

$$K_{5-10} = (1,01 - 6,16 \cdot 10^{-2} \cdot OK_0) 10^{-3}; \quad (7)$$

$$K_{5-20} = (4,31 - 6,16 \cdot 10^{-2} \cdot OK_0) 10^{-3}; \quad (8)$$

$$n_{5-10} = 0,82 + 0,055 \cdot OK_0 \quad (9)$$

$$n_{5-20} = 0,39 + 0,055 \cdot OK_0 \quad (10)$$

Влияние анкерной и волновой фибры, представленное на рисунке 6, описано следующей математической зависимостью:

$$K_{ф.а.в} = \frac{K_{ок.ф.пр}}{K_{ок.ф.а.в}} = 1,8 \mu_{о.ф}^{3,8} \quad (11)$$

Влияние варианта Б при приготовление сталефибробетонной смеси несущественно отличается от варианта А и может оцениваться соответствующими зависимостями, полученными для варианта А.

Показатели удобоукладываемости бетонной смеси OK_0 должны рассчитываться по известным методикам, в том числе с учетом структурных характеристик [4].

Исследования влияния режимов виброуплотнения сталефибробетонной смеси на ее однородность и прочностные характеристики бетона позволили установить, что продолжительность вибрирования должна сокращаться с увеличением показателей удобоукладываемости бетонной смеси. Так, например, при марках подвижности до ПЗ продолжительность виброуплотнения должна находиться в пределах 20...25 секунд и при показателях выше ПЗ – не более 10 секунд.

Сохраняемость показателей удобоукладываемости сталефибробетонных смесей обуславливается теми же факторами, которые определяют сохраняемость обычных бетонных смесей.

2 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Физико-механические свойства сталефибробетона – прочность на сжатие и растяжение, модуль деформации, коэффициенты призмочной прочности - исследовались на бетонах с различными водовяжущими отношениями, содержаниями вяжущего и различной стальной фибре, а также объемными концентрациями теста из вяжущего.

Результаты выполненного большого комплекса исследований физико-механических свойств сталефибробетона позволили установить, что среди многочисленных факторов, оказывающих влияние на значения характеристик свойств наиболее существенными являются: водовяжущее отношение, характеристики прочности вяжущего, объемная концентрация теста из вяжущего, концентрация, удельная поверхность и вид фибры в нем.

Исследования влияния объемного содержания стальной фибры БМЗ на прочность цементного камня при сжатии и растяжении при изгибе проводились с использованием портландцемента ПЦ 500-Д 20 производства ОАО «Красносельскстройматериалы».

Водоцементное отношение цементного камня принималось равным 1,0; 1,1 и 1,2 от коэффициента нормальной густоты, равного 0,268, которое составило: $V/C_{ц.к.} = 0,268; 0,295$ и $0,322$. Соответственно цементно-водное отношение составляло: 3,73; 3,39 и 3,11. Объемное содержание фибры принималось равным: 0; 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0%.

Образцы цементного камня изготавливались в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-90 и подвергались тепловой обработке по режиму 3ч+3ч+12ч+6ч при температуре изотермической выдержки $40^{\circ}C$.

Испытания образцов цементного камня на сжатие и растяжение при изгибе проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-90.

Результаты испытаний представлены в таблице 8 и на рисунках 8 и 9.

Как следует из данных, приведенных в таблице 8 и на рисунке 8, прочность на растяжение при изгибе цементного камня с цементно-водным отношением более 3,2 существенно возрастает до объемного содержания фибры, равного 1%. Дальнейшее увеличение содержания фибры с 1% до 3%, т.е. в три раза, увеличивает прочность на растяжение при изгибе лишь на 17-20%.

Влияние объемного содержания стальной фибры на сопротивление сжатию цементного камня при исследуемых цементно-водных отношениях увеличивается в разной степени от 8 до 23% при увеличении содержания фибры до 3%. По предварительным данным представляется возможным принять увеличение сопротивления сжатию цементного камня по 5% на каждый процент увеличения содержания фибры.

Таблица 8 Результаты исследований физико-механических свойств цементного камня, армированного стальной фиброй $d=0,8$ мм $L=50$ мм

Ц/В	Характеристики свойств	Физико-механические свойства, МПа, при объемном содержании фибры в %				
		0	0,5	1,0	2,0	3,0
3,73	сжатие	60,0	62,4	62,8	64,0	65,0
	растяжение при изгибе	1,404	6,7	14,81	15,52	17,12
3,39	сжатие	55,2	61,9	63,8	67,7	70,2
	Растяжение при изгибе	0,398	3,93	10,38	11,26	12,87
3,11	сжатие	50,6	50,0	50,8	53,08	57,3
	Растяжение при изгибе	0,3	0,55	2,46	7,24	11,32

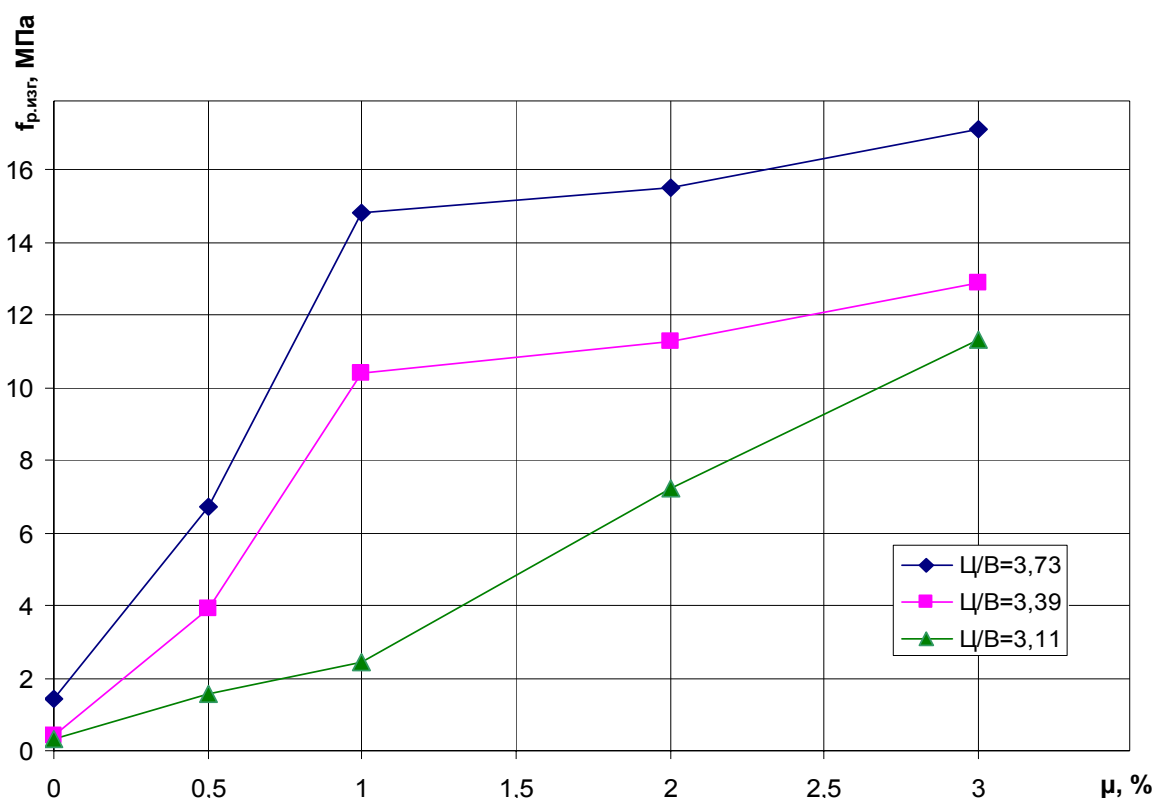


Рисунок 8 – Влияние объемного содержания стальной анкерной фибры на растяжение при изгибе цементного камня

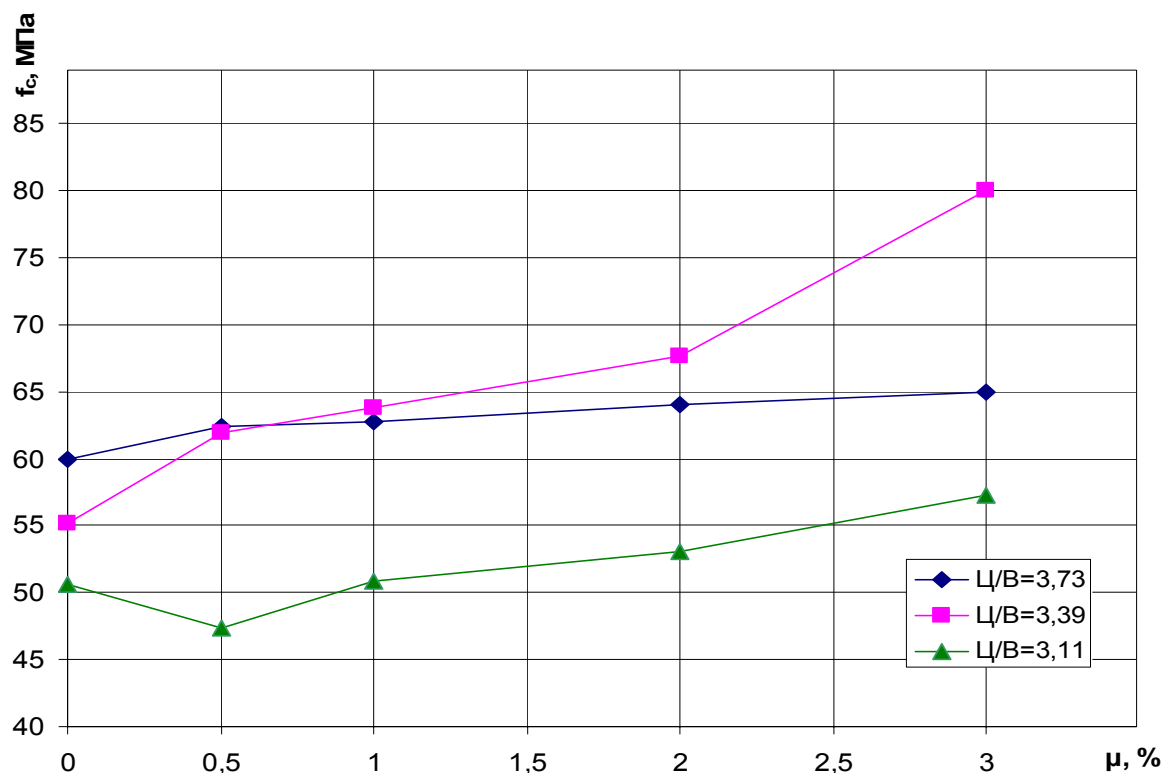


Рисунок 9 – Влияние объемного содержания стальной фибры на сопротивление сжатию цементного камня

В результате анализа выполненных исследований по влиянию содержания стальной фибры на сопротивление сжатию сталефибробетона различных классов по прочности на сжатие и различной удобоукладываемости бетонной смеси установлены значительные колебания прироста прочности, отдельные результаты которых приведены в таблице 9. Так, например, при объемном содержании фибры 0,5% увеличение прочности бетона колеблется от 1 до 13%, а при содержании фибры 1,5% прочность бетона на сжатие увеличивается на 8-29%.

Значения прироста прочности бетона обуславливаются многими факторами, в том числе: цементно-водным отношением бетона, объемным содержанием цементного камня, диаметром, длиной и профилем фибры.

В качестве первого приближение значения коэффициента $K_{с.ф.}$, учитывающего влияние объемного содержания фибры на увеличение прочности сталефибробетона на сжатие допускается рассчитывать по следующей зависимости:

$$K_{с.ф.} = 1 + 1,2\mu_{с.ф.}^{1,2} \quad (13)$$

где $\mu_{с.ф.}$ – объемное содержание фибры в бетоне, %.

Таблица 9 - Результаты исследований технологических и физико-механических свойств сталефибробетона

Наименование материалов	Класс бетона				
	C ¹² / ₁₅	C ¹⁸ / _{22,5}	C ²⁵ / ₃₀	C ³⁰ / ₃₇	C ³⁵ / ₄₅
	Расход материалов, кг/м ³				
Цемент 500-Д20	350	417	480	534	580
Щебень (5-20 мм)	955	997	1016	1048	1064
Песок, кг	800	740	703	661	640
Вода, л	242	229	217	205	195
С-3 сухой, кг	3,59	3,82	4,44	4,75	4,79
Фибра, кг	82	70,2	57,5	43,6	29,4
Физико-механические характеристики бетонной смеси и бетона					
Ц/В	1,446	1,821	2,212	2,605	2,974
Подвижность, ОК, см	25	23-24	21-22	20	19
f _c , МПа	17,30	22,75	29,70	36,45	45,9
f _{p.раск} , МПа	2,21	3,08	3,34	3,71	3,41

Примечание: Характеристики прочности бетона получены при испытаниях образцов после тепловой обработки

Значение $\mu_{о.ф}$ – рекомендуется рассчитывать в зависимости от объемной концентрации цементного камня в бетоне по следующей формуле:

$$\mu_{о.ф} = \mu_{о.ц.к.ф} \cdot m_{ц.к.} \quad (14)$$

где $\mu_{о.ц.к.}$ – объемное содержание фибры в цементном камне, %;

$m_{ц.к.}$ – объемная концентрация цементного камня в бетоне, рассчитываемая по формуле:

$$m_{ц.к.} = \frac{G_{вяж}}{\frac{1}{\rho_{вяж}} + \frac{B + B_{погл}}{G_{вяж} \rho_v}} \quad (15)$$

где $G_{вяж}$ – масса вяжущего в бетоне, включая цемент и тонкодисперсный наполнитель;

$\rho_{вяж}$ – плотность вяжущего;

B – масса воды в бетоне;

$B_{погл}$ – масса воды, поглощенной заполнителем;

ρ_v – плотность воды, принимаемая равной 1000 кг/м^3 .

Значение $\mu_{о.ц.к.}$ принимается равным 1% при $(G_{вяж}/B) > 3,2$ и 3% - при $(G_{вяж}/B) \leq 3,2$.

Прочность на сжатие сталефибробетона в первом приближении рекомендуется рассчитывать по следующей зависимости:

$$f_{с.сж.ф} = K_{с.ф} \left(0,65 \frac{G_{вяж}}{B} (0,45 R_{ц} + 20) (1 - 1,05 \tau_{д.н.}^{1,35}) - 0,565 \right) \quad (16)$$

где $R_{ц}$ – активность цемента, МПа;

$\tau_{д.н.}$ – массовая доля тонкодисперсного наполнителя.

Прочность на растяжение при изгибе рекомендуется определять по следующей зависимости, полученной в результате обобщения экспериментальных данных отечественных и зарубежных исследователей:

$$f_{р.изг.ф} = 2,7 + 1,05 \left(\frac{G_{вяж}}{B} + 1,5 \right)^{0,78} + \left(0,65 + 0,215 \left(\frac{G_{вяж}}{B} - 1,5 \right)^{0,85} \right) \cdot \mu_{о.ф} \quad (17)$$

Выполненный комплекс экспериментальных исследований позволил разработать Рекомендации [1, 2], которые используются при опытно-промышленном освоении сталефибробетонных изделий и возведение монолитных сталефибробетонных конструкций. Полученные данные и результаты новых исследований физико-механических свойств сталефибробетона будут использованы при разработке ТКП «Конструкции бетонные и железобетонные. Часть 15. Конструкции из сталефибробетона. Правила проектирования» и ТКП «Конструкции и изделия из сталефибробетона. Правила приемки».

3 ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Одним из сдерживающих факторов применения сталефибробетонов являются сложности получения однородного композитного материала.

Среди явных технологических проблем использования сталефибробетона выделяются две наиболее сложные: появление неоднородности или так называемое «ежевание» стальной фибры и плохо контролируемое снижение показателей удобоукладываемости готовой сталефибробетонной смеси до параметров, серьезно затрудняющих или делающих невозможным использование смесей, особенно в технологии монолитного строительства (см. рисунки 10, 11).



Рисунок 10 «Классический» пример образования «ежей» из стальной фибры (на переднем плане) в процессе устройства монолитных полов

Каждая из этих проблем влечет за собой комплекс задач более низкого уровня. Так, например, решение задачи предотвращения неоднородности смеси или «ежевания» потребовало применения следующих технологических приемов:

- изменения технологии приготовления сталефибробетонной смеси в сравнении с традиционными методами, в частности, применение многоступенчатого дозирования фибры;
- применения специальных машин и оборудования, например, таких, как полу- и автоматических дозаторов марки DINO-50, DINO-100 фирмы ITF «Fauzertechnik» или установка для подачи и распределения фибры в автобетоносмеситель типа SC-99/3 производства итальянской фирмы «La Matassina» для качественной дозировки и распределения стальной фибры в смеси или специальных технологических приемов приготовления и дозирования фибры при ручной технологии ввода;
- учета геометрических параметров и вида фибры при изготовлении смеси и проектировании композиций, в частности соотношения l/d ;
- обязательного учета максимального содержания стальной фибры при ее дозировании в процентах от объема цементного теста или объемного процента от бетона в целом.



Рисунок 11 Образование «ежеи» из стальной фибры (передний план справа) при устройстве монолитных полов в промышленном здании.

В свою очередь, задача получения сталефибробетонной смеси по критериям удобоукладываемости не ниже марок ПЗ...П4 по СТБ1035-96 (ГОСТ 7473) для устройства различных монолитных конструкций потребовала применения следующих мероприятий:

- соотношения максимального размера крупного заполнителя (10 или 20 мм) с длиной используемой стальной фибры (10...60 мм), ограничения предельного соотношения между мелким и крупным заполнителем, повышения расхода вяжущего в малоподвижных бетонных смесях;
- учета особенностей влияния различной геометрической формы и количества вводимой фибры на снижение параметров удобоукладываемости исходной бетонной матрицы;
- учета характера ориентации тех или иных видов стальной фибры при ее укладке и уплотнении в связи с последующей эксплуатацией конструкции;
- использования различных химических продуктов для предотвращения снижения удобоукладываемости фибробетонной смеси путем применения водоредуцирующих добавок или получения ускоренных режимов твердения бетонов добавками ускорителями.

Общеизвестно, что фибра фрезерованная, резанная из листов, проволочная, и ее процентное содержание, длина существенно влияют на однородность сталефибробетона.

Большое «ежевание» сталефибробетонной смеси становится, как правило, заметным визуально, в то время, как неоднородность средней степени может быть определена преимущественно экспериментально по величине снижения показателей, например, прочности бетона на сжатие, изгиба, или раскалывания в образцах, или по резкому снижению подвижности смеси.

На рисунке 12 представлена зависимость, характеризующая влияние фрезерованной фибры ЗАО «Курганстальмост» на показатели подвижности мелкозернистой бетонной смеси, которая существенно отличается от зависимостей фибры круглого поперечного сечения, представленных в разделе 1. Из приведенных на рисунке 12 зависимостей следует значительно меньшее снижение показателей удобоукладываемости бетонной смеси при применении фрезерованной фибры по сравнению с проволочной фиброй (анкерной, волновой).

Как следует из представленных в разделе 1 зависимостей тип фибры, отношение l_f/d_f и концентрация фибры существенно влияют на изменение показателей подвижности смеси. Метод приготовления смеси в одну стадию или в две стадии и время уплотнения также существенно влияют на конечную прочность сталефибробетона (см. рисунок 13). К числу относительно сложных для распределения видов фибр относится анкерная и волновая фибра РУП БМЗ г. Жлобин, Беларусь. К числу стальных фибр практически не подверженных явлению «ежевания» в обычных дозировках (1...2%) относится фрезерованная фибра ЗАО «Курганстальмост» г.Курган, Россия.

В зависимости от параметров фибры, например, фибры РУП БМЗ, были экспериментально установлены некоторые технологические ограничения, позволяющие свести к минимуму вероятные неоднородности распределения дисперсной арматуры по объему матрицы.

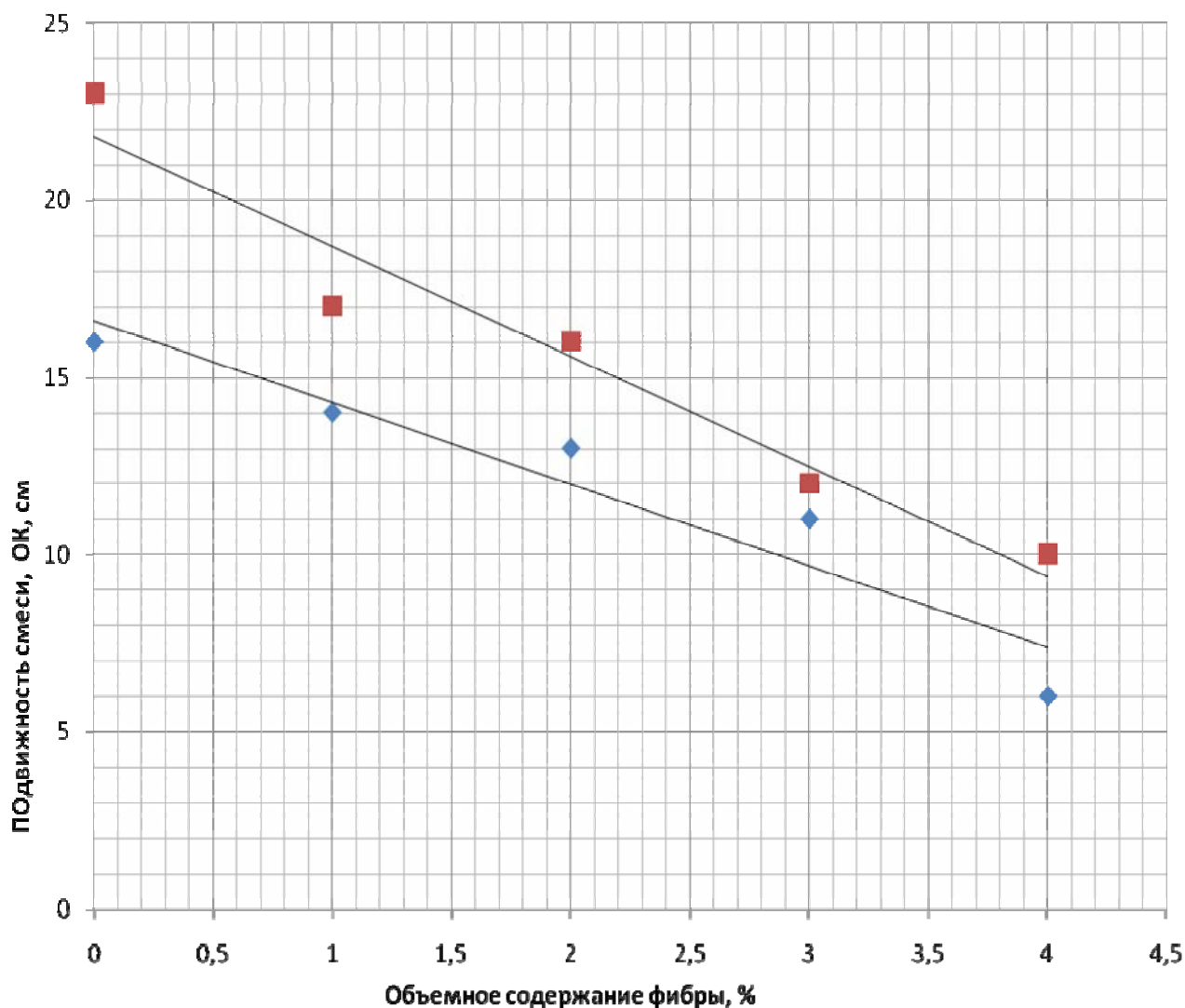


Рисунок 12 - Влияние содержания фрезерованной фибры ЗАО «Курганстальмост» на показатели подвижности мелкозернистой бетонной смеси

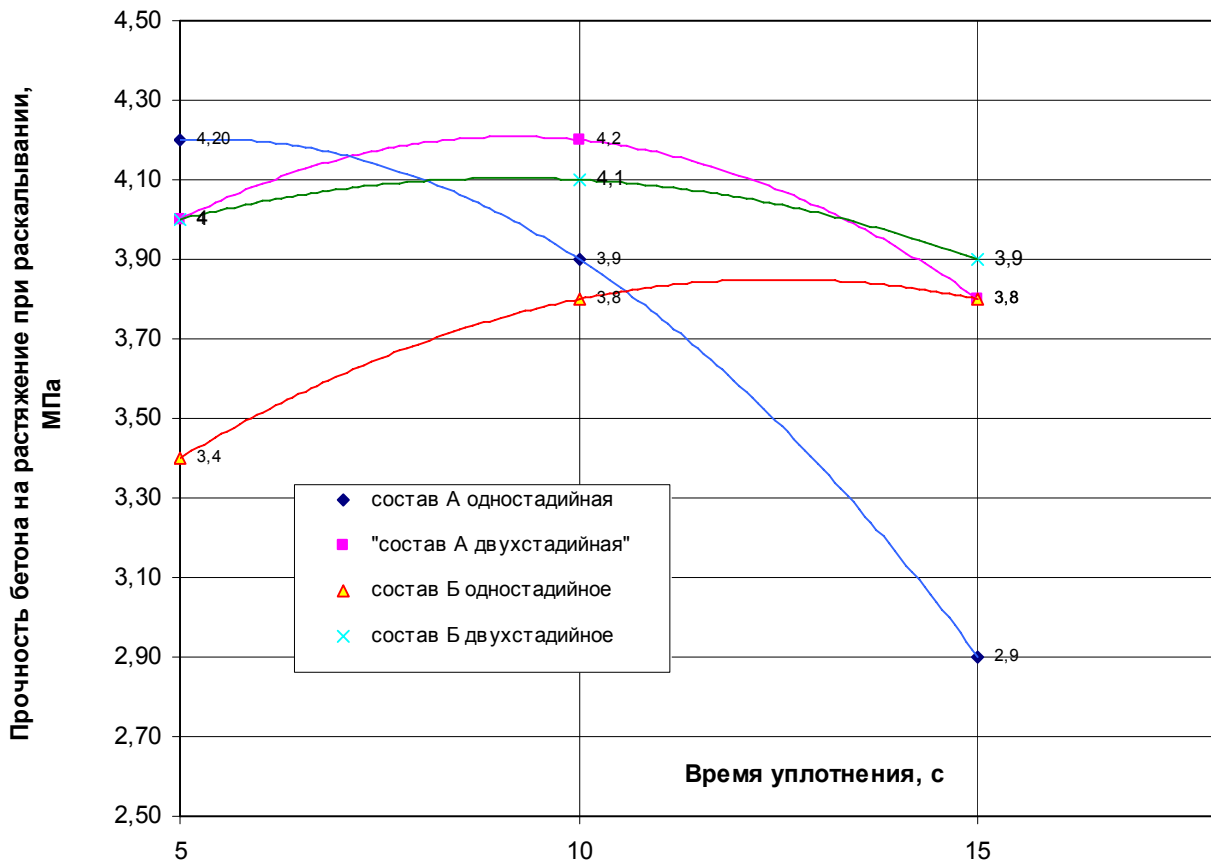


Рисунок 13 Влияние метода приготовления и времени уплотнения смеси на предел прочности на растяжение при раскалывании сталефибробетона.

Фибра БМЗ в соответствующих рекомендациях [1] условно разделена на три типа по виду устойчивости:

1. Фибра **устойчивая** к появлению неоднородности:

- анкерная с $l_f/d_f=43$ и 50 (длина 30 диаметр $0,5$ и $0,6$) при условии ввода не более $\mu_f=0,015$ (1,5%);
- анкерная с $l_f/d_f=45$ и 50 (длина 50 диаметр $1,0$ и $1,1$) при условии ее ввода не более $\mu_f=0,01$ (1,0%);
- анкерная с $l_f/d_f=55$ (длина 60 диаметр $1,1$) при вводе не более $\mu_f=0,01$ (1,0%);
- волнового профиля с $l_f/d_f=30...38$ (длина $15...22$ мм диаметры $0,4...0,7$ мм) при вводе не более $\mu_f=0,005$ (0,5% по объему);
- прямая (микрофибра) с отношением $l_f/d_f=37$ и 43 (длина 13 , 13 мм диаметры соответственно $0,35$, $0,3$ мм) при условии их ввода в количестве не более $\mu_f=0,015$ (1,5% по объему);
- прямая (микрофибра) с отношением $l_f/d_f=52$ (длина 13 мм, диаметр $0,25$ мм) при ее вводе не более $\mu_f=0,01$ (1,0% по объему);

2. Фибра, для которой следует **соблюдать ограничения**:

- анкерная с отношением $l_f/d_f=75$ и 86 (длина 30 диаметр $0,4$ и $0,35$) при условии ее ввода μ_f = от $0,01$ (1,0%) до $0,015$ (1,5%);
- анкерная с отношением $l_f/d_f=67$ и 75 (длина 60 диаметр $0,9$ и $0,8$) при условии ее ввода μ_f =от $0,01$ (1,0%) и до $0,015$ (1,5%);

- волнового профиля с $l_f/d_f=43$ и **50** (длина 15, 15 мм диаметры 0,35, 0,3 мм) при условии их ввода не более $\mu_f=0,01$ (1,0% по объему);
- прямая (микрофибра) с $l_f/d_f=60$ (длина 12 мм диаметр 0,2 мм) при условии ее ввода не более $\mu_f=0,005$ (0,5% по объему);

3. Фибра, для которой следует соблюдать **существенные ограничения**:

- анкерная с отношением $l_f/d_f=100$ (длина 30 диаметр 0,3) при условии ее ввода не более $\mu_f=0,005$ (0,5%);
- волнового профиля с $l_f/d_f=60$ и 75 (длина 15мм диаметры соответственно 0,25, 0,2 мм) при условии их ввода не более $\mu_f=0,005$ (0,5% по объему);

Из приведенных данных следует, что при значениях l_f/d_f более 55...65 следует применять не только многоступенчатую систему дозирования фибр (за 2...3 раза) но и подбирать смеси с повышенным содержанием растворной части и вяжущего и увеличивать показатели подвижности исходной базовой матрицы, как минимум на одну марку.

Многоступенчатые приемы дозирования фибры применяются преимущественно при условии ее дозирования в уже приготовленную смесь непосредственно в автобетоносмеситель. При условии установки специальных дозаторов на стационарных БСУ условия дозирования могут несколько измениться. Однако, в настоящее время, в Республике БСУ не оснащены специальным оборудованием для дозирования стальной фибры. В этой связи практически на всех объектах и в смесях, использованных для изготовления конструкций с применением сталефибробетона, дозирование велось вручную.

Система контроля качества сталефибробетона включает в себя контроль качества исходных материалов, пооперационный контроль технологических процессов приготовления, транспортирования, уплотнения бетонной смеси, режимов твердения бетона и контроль качества бетонных смесей, бетона и конструкций.

К контролируемым параметрам относятся:

- коэффициент расслоения в смеси (на стадии подбора);
- удобоукладываемость смеси (до и после введения фибры);
- средняя прочность бетонной матрицы при сжатии;
- прочность образцов сталефибробетона на растяжение при раскалывании.

Рекомендуется выборочный контроль средней прочности и коэффициента вариации сталефибробетона при оценке прочности на растяжение при раскалывании. Для решения проблем технологии изготовления и применения сталефибробетона РУП «Институт БелНИИС» разработал несколько Рекомендации по фибре проволоочной производства РУП БМЗ [1], и Рекомендации по фибре фрезерованной ЗАО «Курганстальмост» [2].

Область применения сталефибробетона достаточно обширна, но в сложившихся в последнее десятилетие экономических условиях, свое место он нашел преимущественно в промышленных полах, полах складских помещений, а также при изготовлении банковских хранилищ.

Среди объектов, возведенных с применением сталефибробетона, следует привести возведение монолитной плиты «Мобильного сезонного катка по проспекту Победителей в г. Минске» (см. рисунки 14-16) в 2008 году. Подрядчик - ОАО «Стройтрест №4».

Прочность сталефибробетона согласно протоколу испытаний образцов из отобранной смеси №144 от 25 апреля 2008 г. через 72 часа составила 24,0...25,3 МПа (50...53 % от прочности бетона класса С30/37 (М450)), что позволило использовать технологическое оборудование и спецтехнику на монолитной плите катка уже на 4...5-е сутки после укладки бетона.

Прочность бетона матрицы и сталефибробетона на сжатие в проектном возрасте составили соответственно $R_{b28}=47,9$ МПа и $R_{bf28}=48,3$ МПа, что соответствует классу С30/37. Показатели сталефибробетона класса С30/37 на растяжение при раскалывании 3,4 МПа.

На объекте использовали сталефибробетон двух типов тип 1 и тип 2. Составы сталефибробетона класса С25/30 и С30/37 для полов обеих типов приведены ниже.



Рисунок 14 Процесс выгрузки сталефибробетонной смеси с маркой удобоукладываемости П4 из автобетоносмесителя при устройстве монолитной плиты толщиной 160 мм мобильного катка по пр. Победителей г.Минск



Рисунок 15 Укладка сталефибробетонной смеси с уплотнением виброрейкой на отдельной полосе плиты толщиной 160 мм. Фибра фрезерованная ЗАО «Курганстальмост», расход 60кг/м³. Мобильный сезонный каток в г.Минске



Рисунок 16 Общий вид монолитной плиты катка из сталефибробетона класса С30/37 после нанесения упрочняющего покрытия (тип полов I)

Состав №1 сталефибробетона класса С30/37 для устройства полов типа 1

Цемент ПЦ500 – Д0 ОАО “Красносельскстройматериалы” – 540 кг/м³;
Щебень гранитный карьера Микашевичи фракции 5–20 мм – 960 кг/м³;
Песок с модулем крупности 2,4...2,6 – 760 кг/м³;
Комплексная добавка «Реламикс» тип.2 – 4,05 кг/м³ на сухое вещество;
Вода (ориентировочно в расчете на сухие заполнители) – 185...190 л/м³;
Фрезерованная стальная фибра ЗАО «Курганстальмост» - 60 кг/м³.

Состав №2 сталефибробетона класса С25/30 для устройства полов типа 2

Цемент ПЦ500 – Д20 ОАО “Красносельскстройматериалы” – 460 кг/м³;
Щебень гранитный карьера Микашевичи фракции 5–20 мм – 960 кг/м³;
Песок с модулем крупности 2,4...2,6 – 820 кг/м³;
Добавка СП-1 (С-3) – 3,68 кг/м³ в расчете на сухое вещество (0,8 % от МЦ);
Вода (ориентировочно в расчете на сухие заполнители) – 180...185 л/м³;
Фрезерованная стальная фибра ЗАО «Курганстальмост» - 60 кг/м³.

Подвижность смеси на объекте до введения фибры соответствовала марке П4. Перемешивание смеси в автобетоносмесителях с введенной за два раза фиброй на объекте велось в течение не менее 15 минут.

Общий объем сталефибробетона классов С25/30, С30/37, уложенного в монолитную плиту толщиной 160 мм «Мобильного сезонного катка по проспекту Победителей в г. Минске», составил 590,4 м³.

Основное преимущество данного вида полов заключается в снижении стоимости на 1м² (см. таблицу 10). Как следует из данных, приведенных в таблице 10, снижение стоимости полов в среднем на 20...30% достигается преимущественно за счет уменьшения расходов бетона (уменьшения толщины плиты) и снижения трудоемкости работ.

К настоящему времени сталефибробетон использовался при строительстве ряда крупных объектов. В их числе монолитные конструкции глинозапасников в ходе реконструкции ПРУП «Кричевцементосифер» г. Кричев и ПРУП «БЦЗ» г.п. Костюковичи, где было уложено подрядчиками работ ОАО «Строительный трест №3» г.Солигорск и ОАО «Гомельпромстрой» более 4000 м³ сталефибробетона класса С25/30 с маркой по подвижности смеси П4.

Общее количество использованной фибры волнового профиля типа ФСВ-30/0,6 с расходом 40 кг/м³ производства БМЗ по данным двум объектам составило более 170 т.

Кроме того, в активе сталефибробетона промышленные полы Горынского КСМ. Возводятся промышленные полы из сталефибробетона и на строящемся вагоностроительном заводе в г.п. Осиповичи.

Среди некоторых интересных задач было применение сталефибробетона для восстановления монолитных конструкций дорожных карт на объекте «Технологические дороги РУП БМЗ», где специалистами РУП «Институт БелНИИС» был применен высокопрочный монолитный сталефибробетон класса С35/45 с содержанием стальной фибры анкерного профиля в количестве 117 кг/м³, рассчитанный на действие тяжелой технологической техники с нагрузкой на ось порядка 150 кН (см. рисунок 17).

Не менее важной областью применения сталефибробетона является изготовление сборных конструкций. РУП «Институт БелНИИС» целенаправленно ведет работу в этой области с 2005 года. Сложности заключаются в необходимости не только переработки существующих рабочих чертежей определенных серий, но и в проведении зачастую дорогостоящих и трудоемких испытаний конструкций нагружением.

К настоящему времени утвержден Альбом рабочих чертежей на панели ограждений по серии БЗ.017.1-7.05 (рег. номер №430 РУП «Минсктиппроекта»).

Процесс испытаний панелей ограждений по СТБ 1236-2000 и экспериментальных конструкций, изготовленных с использованием 0,5% (40кг/м³) фибры ЗАО «ТАНИС» показан, на рисунке 18.

Разработаны также рабочие чертежи колец колодцев типа КС-9, КС-10 колец по сериям 3.900.1-14 «Изделия железобетонные для круглых колодцев водопровода и канализации» и БЗ.003.1-1 «Изделия железобетонные для круглых колодцев канализационных, водопроводных и газопроводных сетей» (см. рисунок 18), изготовленные без использования обычной арматуры на мощностях завода ЖБИ «Минскметростроя».

Таблица 10. Сравнительная стоимость устройства монолитных полов на 1000 м²

Наименование	Характеристики конструкции основания (пола, дороги):	Стоимость работ, (с НДС)
Вариант 1а Обычный	плита 200 мм из бетона С18/22,5 с двойным армированием из арматуры А-III Ø12 мм с шагом 150*150 мм (вес арматуры на 1м ² -21,32 кг)	стоимость 1м2 148 047 руб. в т.ч. мат-лы 110 497 руб. работа – 37 550 руб.
Вариант 1б с фиброй	бетонная плита т.160 мм из бетона С18/22,5 с армированием стальной фрезерованной фиброй 40 кг/м ³ бетонной смеси.	стоимость 1м2 87461 руб. в т.ч. мат-лы 63 711 руб. работа – 23 750 руб.
Вариант 2а Обычный	плита 150 мм из бетона С18/22,5 с двойным армированием из арматуры А-III Ø12 мм с шагом 150*150 мм (вес арматуры на 1м ² -10,66 кг)	стоимость 1м2 93 023 руб. в т.ч. мат-лы 68 576 руб. работа –24 447 руб.
Вариант 2б с фиброй	бетонная плита 120 мм из бетона С18/22,5 с армированием стальной фрезерованной фиброй 40 кг/м ³ бетонной смеси.	стоимость 1м2 66 494 руб. в т.ч. мат-лы 47 783 руб. работа –18 711 руб.

Примечания: Принятая стоимость материалов с учетом НДС
 Бетон С18/22,5 253 940 рублей/м³
 Арматура А III д.12мм – 2 348 200 рублей/тн
 Фибра стальная – 3 150 600 рублей /т

Расчет стоимости полов в ценах 2 кв. 2007 года выполнен ООО «Баумаксима» г.Минск.



Рисунок 17. Общий вид технологического транспорта РУП БМЗ с нагрузкой на ось до 150 кН и монолитных плит технологических дорог, г. Жлобин



Рисунок 18. Испытание панелей оград из сталефибробетона



Рисунок 19. Подготовка к испытаниям сталефибробетонного кольца КС10-9 по «повернутой схеме»

До конца 2011 года будет утвержден, переработанный альбом рабочих чертежей на сталефибробетонные конструкции тунбингов марок 55Р.Н.СФ-1, 55Р.Н.СФ-2 по серии 10М-К-ЖБ «Сборная железобетонная ребристая обделка перегонных тоннелей» ОАО «Метро-проект», 2000 г. (см рисунки 20, 21).



Рисунок 20. Испытания экспериментальных конструкций тунбингов 55Р.Н.



Рисунок 21. Изготовленные экспериментальные тьюбинги. Внизу типовой тьюбинг марки 55Р, далее вверх тьюбинги 55Р.Н.СФ-1, 55Р.Н.СФ-2.

Совместно с ЧУП «Минскметропроект» и ЖБИ «Минскметростроя» планируется разработка ряда новых конструкций из сталефибробетона для третьей линии Минского метрополитена.

Планируется также применение стальной фибры в конструкциях дорожных плит временных дорог. Эта работа осуществляется в ОАО «Минскпромстрой», где уже изготовлена партия плит около 20 штук, которые находятся в опытной эксплуатации. Прорабатываются вопросы применения данных бетонов и в других сборных железобетонных конструкциях.

Перспективным также является применение сталефибробетона в конструкциях буронабивных свай, подземных частях фундаментов, перекрытиях каркасных зданий с максимальным снижением обычного армирования, в высокопрочных бетонах высотных зданий для снижения хрупкости материала и повышения его огнестойкости, взлетных полос аэродромов, защитных и сейсмостойких конструкциях и т.д.

Таким образом, постепенно сталефибробетон завоевывает все новые позиции и находит применение в современных конструкциях и изделиях.

Следует ожидать, что после разработки и введения в действие новых отечественных ТКП по проектированию и технологии изготовления конструкции и изделий с применением сталефибробетона процесс внедрения данного прогрессивного материала значительно ускорится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследований технологических свойств сталефибробетонных смесей (показателей удобоукладываемости, характеристик однородности и потери подвижности) установлено, что они обуславливаются характеристиками начальной удобоукладываемости бетонной смеси (при нулевом содержании фибры), видом, диаметром и объемным содержанием фибры, крупностью зерен заполнителя.

2. Представлены экспериментально-теоретические зависимости показателей удобоукладываемости сталефибробетонной смеси от установленных факторов. При этом характеристики диаметра и объемного содержания фибры предложено оценивать комплексным фактором $S_{y.n.}$ – удельной поверхностью фибры в объеме бетона. Полученные

экспериментально-теоретические зависимости могут использоваться в методике проектирования составов сталефибробетона.

3. Выполненный комплекс исследований прочности сталефибробетона позволил выявить основные факторы, которые должны учитываться при оценке прочности на сжатие и растяжение. Получены математические модели прочностных показателей сталефибробетона, которые могут использоваться при проектировании сталефибробетонных конструкций.

4. Представлены результаты обобщения опыта применения сталефибробетонных конструкций в Республике Беларусь и направления дальнейшего их развития в различных областях строительства.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Р1.03.054-2009. Рекомендации по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2009. – 106 с.

2. Р5.03.084.11. Рекомендации по проектированию строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением фрезированной фибры ЗАО «Курганстальмост». Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2011. – 87 с.

3. Каталог КХД-2-2011. Химические добавки для бетонов и строительных растворов. – Минск: Минсктиппроект, 2011. - 101 с.

4. Блещик, Н.П. Основы прогнозирования технологических и физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, Д.С. Котов// Проблемы современного бетона и железобетона, часть 2 Технология бетона. - Минск, 2009. – Сь. 132-158.