

05.23.08

П323



На правах рукописи

ПИКУС Григорий Александрович

**ТЕХНОЛОГИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ
ПОВЫШЕНИЕ ЕГО КОНСТРУКЦИОННЫХ СВОЙСТВ**

**Специальности: 05.23.01 – "Строительные конструкции, здания
и сооружения",**

05.23.08 – "Технология и организация строительства"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2000

Работа выполнена на кафедре технологии строительного производства Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН Головнев С.Г.

Научный консультант – кандидат технических наук,
доцент Евсеев Б.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ивашенко Ю.А.;
доктор технических наук,
профессор Одинцов Д.Г.

Ведущая организация – муниципальное предприятие "Челябметротранспроект".

Защита состоится "8" декабря 2000 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета К053.13.05 Южно-Уральского государственного университета по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "3" ноября 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

 Трегулов Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из направлений улучшения конструкционных свойств бетонов является введение в состав бетонной смеси равномерно распределенных стальных волокон. Главным критерием при разработке технологии фибробетона стало получение конструкционного бетона с высокими эксплуатационными свойствами.

Характерной особенностью большинства работ по дисперсно-армированным бетонам является то, что в них, в основном, изучаются свойства фибробетонов и сравнительно мало уделяется внимания взаимосвязи технологии и конструкционных свойств сталефибробетона.

По прогнозам НИИЖБ и ЦНИИпромзданий объем применения сталефибробетона в строительстве в 2005 году может составить 2,35 млн. м³. Это потребует решения проблемы круглогодичного производства сталефибробетонных работ. Кроме того, накопленный научный и практический опыт применения сталефибробетона требует определения таких технологий производства работ, которые обеспечивают повышение конструкционных свойств сталефибробетона и улучшения качества конструкций.

В результате была сформулирована цель диссертационной работы, которая заключается в разработке технологии сталефибробетона, обеспечивающей повышение его конструкционных свойств, в том числе и в зимних условиях.

Достижение поставленной цели осуществляется решением следующих основных задач:

- исследование технологических и прочностных свойств различных типов фибр, влияние качества боковой поверхности на прочность сцепления с цементным камнем в условиях его нормального хранения, замораживания и термообработки;
- разработка методики подбора состава сталефибробетона с учетом влияния площади боковой поверхности и геометрии фибр;
- исследование влияния последовательности загрузки компонентов сталефибробетона на равномерность распределения фибр в смеси;
- исследование влияния процента армирования сталефибробетона на масштабный коэффициент при определении прочности;

- исследование электрофизических характеристик и удобоукладываемости сталефибробетонной смеси, подвергнутой термообработке;
- исследование влияния водоцементного отношения, процента армирования, температуры разогрева и пластифицирующей добавки на кинетику набора прочности и конечную прочность сталефибробетона;
- разработка технологического регламента на производство сталефибробетонных работ;
- оценка технико-экономических показателей эффективности и внедрение полученных результатов.

Научная новизна работы:

- выявлено влияние типа исходного сырья для производства фибр на их качество и прочность;
- предложена аналитическая модель сцепления фибр с матрицей, позволяющая аналитически определять критическую длину фибры в зависимости от качества ее боковой поверхности;
- получены по единой методике результаты влияния различных типов фибр и условий твердения образцов на прочность сцепления фибр с цементным камнем;
- установлены зависимости масштабного коэффициента при определении прочности сталефибробетона на сжатие от процента армирования;
- установлены аналитические зависимости влияния состава сталефибробетона на электрофизические характеристики и удобоукладываемость сталефибробетонной смеси подвергнутой термообработке;
- получены аналитические зависимости влияния состава сталефибробетона на кинетику роста и конечную прочность при его термообработке.

Практическая ценность работы:

- доказана эффективность применения фибр из стального листа для приготовления конструкционного сталефибробетона;
- разработаны методики подбора состава и оценки качества сталефибробетонной смеси;
- определено влияние технологических параметров сепаратора для введения фибр в бетонную смесь на его производительность;
- предложена оптимальная последовательность загрузки компонентов сталефибробетона в бетоносмесительные установки;

– разработанная методика подбора состава сталефибробетона позволяет повысить удобоукладываемость смеси при сохранении требуемой прочности;

– на основании проведенных исследований и результатов внедрения доказана технико-экономическая целесообразность производства сталефибробетонных работ с использованием электротермообработки и, в частности, предварительного электроразогрева, обеспечивающая уменьшение энергозатрат и снижение себестоимости работ;

– разработаны Технологический регламент на производство сталефибробетонных работ и компьютерная программа для контроля температурных режимов и прочностных параметров сталефибробетонов для различных конструкций, выдерживаемых в зимних условиях.

Внедрение результатов:

Результаты исследований были использованы при реконструкции покрытия пролетных строений и деформационных швов моста через р.Синара на 112 км автодороги "Подъезд к г.Екатеринбург" и при устройстве дорожной одежды путепровода на месте пересечения автодорог "Челябинск – Харлуши" и "Обход г.Челябинска".

Апробация работы:

Основные положения работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях в Южно-Уральском государственном университете; на международном научно-техническом симпозиуме "Применения сталефибробетона в транспортном строительстве" (г.Москва, 1998 г.); на XXX Всероссийской научно-технической конференции (г.Пенза, 1999 г.).

Достоверность экспериментальных данных, полученных аналитических зависимостей и выводов подтверждается достаточным количеством проведенных экспериментов, адекватным выбором математических моделей, применением современных методов математической обработки результатов исследований на ЭВМ и результатами внедрения полученных данных в условиях строительной площадки. Коэффициент вариации экспериментальных данных находился в допустимых пределах (не превысил 9,2%) при доверительной вероятности 95%.

Объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и основных выводов, изложенных на 214 страницах, 59 рисунков, 40 таблиц, 12 страниц библиографии (120 наименований) и содержит 2 страницы приложений.

Публикации. Основные положения представленной работы изложены в 7 печатных работах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, достоверность и практическая значимость работы.

В первой главе описаны основные характеристики и области применения дисперсно-армированных бетонов, проведен анализ современных представлений о механизме упрочнения бетонной матрицы фибрами, рассмотрены технологические особенности изготовления стальных фибр, а также приготовления и укладки сталефибробетона при положительных и отрицательных температурах окружающей среды.

Большой вклад в развитие технологии фибробетона и зимнего бетонирования внесли ученые: Арбеньев А.С., Ахвердов И.Н., Берг И., Волков И.В., Гетун Г.В., Гныря А.И., Головнев С.Г., Евсеев Б.А., Заседателев И.Б., Королев К.М., Крылов Б.А., Курбатов Л.Г., Лобанов И.А., Лысенко Е.Ф., Мандель Д.А., Меркин В.Е., Миронов С.А., Михайлов К.В., Рабинович Ф.Н., Ромуальди Д.П., Рыбасов В.П., Талантова К.В., Хайдуков Г.К. и др.

Обзор литературы по дисперсно-армированным бетонам выявил характерную особенность большинства работ, которая заключается в том, что в них, в основном, изучаются свойства фибробетонов и сравнительно мало уделяется внимания влиянию технологии приготовления и укладки сталефибробетона на его конструкционные свойства. Это определило направления дальнейших исследований.

Во второй главе исследованы прочностные и технологические свойства стальных фибр различных типов, предложена аналитическая модель работы стального волокна при его вытягивании из матрицы, исследовано влияние различных технологических факторов на прочность сцепления фибры с цементным камнем.

Для сталефибробетона немаловажным фактором является обоснование используемого типа фибр, обладающих комплексом свойств: высокой прочностью на растяжение, надежным сцеплением с бетоном, не слеживаться при хранении и транспортировании, свободно рассыпаться при введении в приготавливаемую

смесь, легко смешиваться с нею в смесителях различных типов с высокой степенью однородности и без образования ежей.

Результаты проведенных исследований показывают, что на постоянство геометрических и физико-механических свойств фибры оказывает влияние тип исходного сырья. Исходя из полученных данных построены гистограммы распределения фибр, производимых в России, по массе и прочности. На рис. 1 и 2 представлены гистограммы распределения прочности фибр, изготовленных путем рубки стального листа (технология ЮУрГУ) и фрезерования слитка (лицензия фирмы Vulkan Technologies International GmbH).

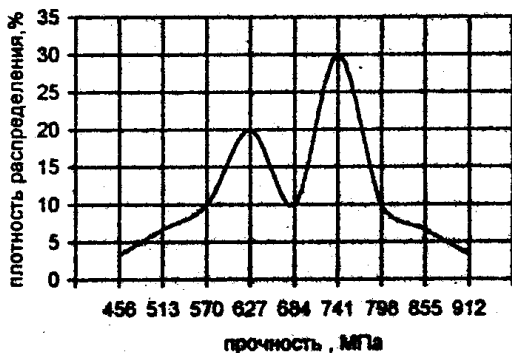


Рис.1. Распределение фибр из слитка по прочности
(коэффициент вариации 15,57)

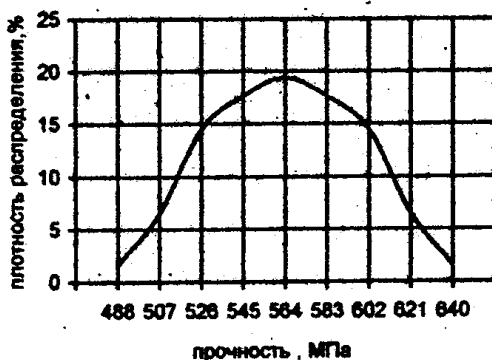


Рис.2. Распределение фибр из листа по прочности
(коэффициент вариации 6,03)

Анализ данных исследований позволил получить формулу, которая дает возможность на стадии проектирования технологических процессов определять насыпную плотность массы фибр из стального листа:

$$P = \frac{3,484 \cdot \gamma \cdot d_{\text{усл}}}{L}, \quad (1)$$

где L – длина фибры;

$d_{\text{усл}}$ – условный диаметр фибры;

γ – объемная масса стали.

Использование в формуле (1) условного диаметра фибры $d_{\text{усл}}$ объясняется искажением в процессе рубки фибры ее поперечного сечения.

Анализ исследований показал, что при одном и том же проценте армирования и отношении L/d с использованием коротких волокон в объеме бетонной смеси резко увеличивается число волокон и площадь их боковой поверхности. Как следствие, это увеличивает энергоемкость процесса приготовления смеси, снижает ее подвижность, увеличивает трудоемкость укладки в конструкции, что следует учитывать при проектировании составов сталефибробетонных смесей.

При выборе армирующих волокон важное значение имеет их критическая длина, оказывающая влияние не только на прочностные свойства сталефибробетонных конструкций, но и влияющая на технологические процессы приготовления и укладки смесей.

Предложенная аналитическая модель работы волокна при его вытягивании из матрицы позволила получить формулу для определения критической длины фибры, согласно которой критическая длины фибры пропорциональна ее диаметру и зависит от качества ее боковой поверхности:

$$L_{\text{кр}} = -\frac{2f}{kU} \ln\left(1 - \frac{k\sigma_{\text{в}}}{\tau_0}\right), \quad (2)$$

где τ_0 – касательное напряжение, определяемое физической природой сцепления бетона с металлом волокна;

$\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала волокна на растяжение;

k – комплексный коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона для материала волокна и физических свойств его боковой поверхности;

U – периметр волокна;

f – площадь поперечного сечения волокна.

Для исследования сцепления фибры с матрицей разработана методика, имитирующая условия работы волокна в сечении с трещиной. Исследование совместной работы разных типов фибр с цементным камнем одной и той же прочности по данной методике подтвердило, что на прочность сцепления существенное значение оказывает качество боковой поверхности фибры. При этом применение фибр с прямолинейной осью не позволяет одновременно обеспечить предъявляемые к ним прочностные и технологические требования, что вызывает необходимость применения анкеров, искривления оси и других мероприятий по повышению качества сцепления.

Применение сталефибробетона в зимних условиях требует разработки технологий производства работ при отрицательных температурах окружающей среды, обеспечивающих набор необходимой прочности сталефибробетонной конструкции до ее замораживания.

Эксперименты показали, что раннее замораживание свежееуложенного цементного теста оказывает влияние на прочность сцепления фибры и цементного камня (прочность контакта снижается на 32%). Повторное уплотнение оттаявшего цементного теста позволяет восстановить прочность сцепления с фиброй и повысить прочность цементного камня (прирост прочности на 7%).

Предварительные эксперименты и анализ литературных источников позволили сделать вывод о том, что одним из наиболее эффективных методов зимнего бетонирования является электротермообработка сталефибробетона.

Проведенные исследования показали, что в 28-ми суточном возрасте прочность цементного камня образцов, подвергнутых электропрогреву уменьшается на 8%, а подвергнутых предварительному электроразогреву увеличивается на 4% по сравнению с образцами нормального хранения не подвергнутых термообработке. При этом прочность сцепления фибры с цементным камнем не изменяется. Таким образом, метод предварительного электроразогрева является одним из важных инструментов повышения конструктивных свойств сталефибробетона.

В третьей главе описаны материалы применяемые в исследованиях и методика их проведения, разработаны методики проектирования составов сталефибробетона и оценки качества сталефибробетонной смеси. Проведены исследования по определению влияния технологических параметров приготовления и укладки сталефибробетонной смеси на прочностные свойства сталефибробетона.

Получение сталефибробетона с заданными конструкционными свойствами обеспечивается в первую очередь за счет правильного подбора состава.

Сталефибробетонная смесь подобранного состава должна обладать удобоукладываемостью, предусмотренной в проекте.

Определение состава сталефибробетона осуществляется в два этапа:

1. Определяется состав исходного бетона.
2. Полученный состав корректируется с учетом влияния фибровой арматуры на соотношение компонентов.

Корректировать исходный состав бетона необходимо путем исключения из состава бетона части песка, площадь боковой поверхности которого равна площади боковой поверхности вводимой фибры.

Приготовленная сталефибробетонная смесь характеризуется, в основном, такими параметрами качества, как степень однородности распределения фибры в бетоне и удобоукладываемость.

В работе были проведены исследования, целью которых является установление степени однородности сталефибробетонной смеси в зависимости от последовательности загрузки ее компонентов.

Программа исследований включала следующие способы приготовления смеси:

- 1 – смешивались инертные, фибра и цемент, затем добавлялась вода;
- 2 – в заранее приготовленный бетон вводилась фибра;
- 3 – цемент и инертные перемешивались в бетоносмесителе в течение 2–3 минут. Затем в сухую смесь заливалось 50% воды от расчетного количества и вновь осуществлялось перемешивание в течение 2 минут. После этого в работающий бетоносмеситель вводилось расчетное количество фибры и оставшаяся часть воды:

Отбираемые для исследования однородности пробы должны быть представительными, чтобы случайные отклонения результатов эксперимента не изменяли общую картину распределения фибр по объему смеси. С одной стороны, чем меньше вес пробы, тем точнее может быть охарактеризовано качество смеси, с другой стороны – уменьшать вес пробы беспрдельно нельзя, так как может наступить такой момент, когда недостаточное количество фибр в пробе может сказаться на величине однородности их распределения. Таким образом, важной задачей при оценке однородности сталефибробетонной смеси является выбор представительной пробы.

На основе теории смешения сыпучих материалов и особенностей фибрового армирования была выведена формула, позволяющая определить минимальный вес пробы, необходимый для оценки однородности сталефибробетонной смеси:

$$G = \frac{3,15 \cdot 10^3 \cdot d^2 \cdot L \cdot \rho_{\text{стали}}}{\mu}, \quad (3)$$

где L – длина фибры;

$\rho_{\text{стали}}$ – плотность стали;

μ – процент армирования фиброй по массе.

Рассмотренные способы приготовления сталефибробетонной смеси позволили сделать следующие выводы:

– способ 1 показывает наихудший результат по качеству готовой смеси и приводит к повышенной запыленности рабочего места в процессе перемешивания;

– способ 2 свободен от недостатков, присущих способу №1 и позволяет осуществлять введение фибры в готовую бетонную смесь доставленную автобетоносмесителем.

– способ 3 также свободен от недостатков, присущих способу №1 и дает наилучшие результаты по качеству смеси.

Общеизвестно, что введение в бетонную смесь фибр позволяет уменьшить влияние возможных дефектов структуры матрицы на ее прочностные параметры. В связи с этим были проведены испытания сталефибробетонных образцов на сжатие с содержанием фибры 0,5, 1,0 и 1,5% по объему в сравнении с неармированным бетоном.

Анализ полученных результатов показывает, что масштабный коэффициент, полученный для образцов из обычного бетона 0,948, соответствует величине масштабного коэффициента 0,95, установленного в ГОСТ 10180-90. Масштабный коэффициент сталефибробетонных образцов увеличивается от 0,956 до 0,975 с повышением процента армирования и превосходит соответствующий показатель образцов из обычного бетона (рис.3).

Одним из важных вопросов, возникающих при выборе той или иной технологии производства работ является определение влияния соотношения компонентов сталефибробетона на его реологические и конструкционные свойства

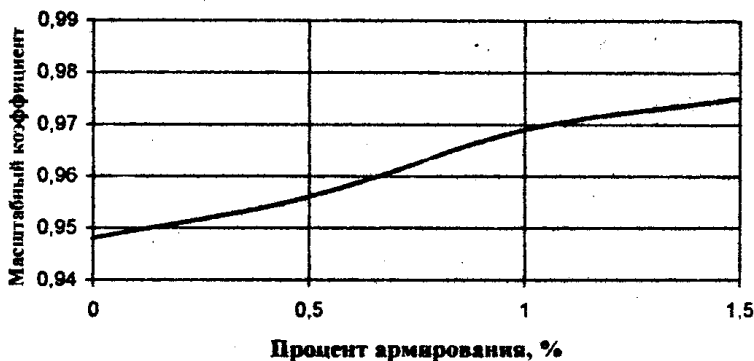


Рис.3. Влияние процента армирования на масштабный коэффициент

С целью изучения влияния некоторых компонентов сталефибробетона на его удобоукладываемость и прочностные характеристики реализован трехфакторный эксперимент, поставленный с использованием метода математического планирования. В качестве независимых факторов выбраны: водоцементное отношение (X_1), содержание фибровой арматуры (X_2), содержание пластифицирующей добавки С-3 (X_3). Уровни факторов представлены в табл.1.

Таблица 1

Уровни факторов

Фактор	Единица измерения	Уровни факторов				
		-1,684	-1	0	+1	+1,684
X_1	-	0,224	0,35	0,425	0,50	0,626
X_2	%	0	0,406	1,0	1,594	2,0
X_3	%	0	0,325	0,80	1,275	1,60

После экспериментальной реализации плана проводилась обработка полученных результатов на ЭВМ, в результате которой получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 12,52 - 11,72 X_1 + 6,06 X_2 - 7,24 X_3 + 8,50 X_1^2 - 1,50 X_1 X_2 + 4,00 X_1 X_3 + 2,33 X_2^2 - 1,25 X_2 X_3 + 2,16 X_3^2$$

$$Y_2 = 41 - 1,53 X_1 + 2,51 X_2 + 0,71 X_3 - 1,23 X_1^2 - 0,025 X_1 X_2 + 0,075 X_1 X_3 - 0,0833 X_2^2 + 0,2 X_2 X_3 + 0,0577 X_3^2$$

$$Y_3 = 6,21 - 0,48 X_1 + 0,79 X_2 + 0,21 X_3 - 0,49 X_1^2 + 0,16 X_1 X_2 + 0,0613 X_1 X_3 - 0,14 X_2^2 - 0,0138 X_2 X_3 - 0,268 X_3^2$$

где Y_1 – жесткость сталефибробетонной смеси, с;

Y_2 – прочность сталефибробетона при сжатии, МПа;

Y_3 – прочность сталефибробетона на растяжение при изгибе, МПа.

Как показали предварительные исследования, уплотнение сталефибробетонных образцов, размеры поперечного сечения которых в три и более раз превышают длину фибры, приводит к равновероятностной ориентации волокон в пространстве. В тоже время, уплотнение образцов слоями высотой менее или соизмеримой с длиной фибры вызывает ориентацию фибр преимущественно в горизонтальной плоскости.

Для установления количественной зависимости прочности сталефибробетона от величины уплотняемого слоя были изготовлены четыре серии образцов в виде призм размерами 150×150×600 мм. Серии отличались друг от друга объемным процентом армирования: для серии А – 0%, серии Б – 0,5%, серии В – 1% и серии Г – 1,5%. Образцы уплотнялись слоями от 25 до 150 мм при постоянном общем времени вибрирования. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов, выполненных
с послойной укладкой бетонной смеси

Серия	№ образца	Процент армирования	Толщина слоя, мм	Значение прочности, Мпа	
				$R_{сж}$	$R_{н}$
А	1	0	150	35,8	3,2
	2		25	37,6	4,1
	3		50	37,2	4,2
	4		75	36,9	4,0
Б	1	0,5	150	36,9	3,9
	2		25	42,7	6,5
	3		50	41,8	6,0
	4		75	41,3	5,7
В	1	1,0	150	41,0	5,4
	2		25	43,5	7,8
	3		50	44,3	7,1
	4		75	42,7	6,6
Г	1	1,5	150	42,4	6,3
	2		25		
	3		50		
	4		75		

Проведенные исследования показали, что послойная (до 75 мм толщины слоя) укладка сталефибробетона повышает его прочностные характеристики и увеличивает коэффициент использования фибровой арматуры, т.е. таким способом можно достичь преобладающей ориентации фибр вдоль главных растягивающих напряжений, возникающих в конструкциях при восприятии эксплуатационных нагрузок.

В четвертой главе исследовалось влияние состава и температуры термообработки сталефибробетонной смеси на ее удельное электросопротивление и удобоукладываемость, кинетику твердения и величину конечной прочности сталефибробетона; изучалось также влияние раннего замораживания на прочность сталефибробетона.

При расчете технологических параметров методов ускоренного твердения на основе применения переменного электрического тока расчетными величинами являются минимальное ρ_{\min} и среднее $\rho_{\text{ср}}$ удельное электросопротивление бетона. На основании результатов эксперимента была построена номограмма и получено математическое выражение, описывающее изменение минимального и среднего удельного сопротивления сталефибробетона в зависимости от водоцементного отношения (В/Ц) и процента армирования (μ) для бетонов без пластифицирующей добавки:

$$\rho = A \cdot (B/C)^F \cdot e^{(\mu+B)} + \ln((B/C)^C) + D \quad (4)$$

Коэффициенты к формуле (4) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты к формуле (4)

Определяемая величина	Коэффициенты				
	A	B	C	D	F
ρ_{\min}	-0,127	0,935	-8,847	-1,048	-0,911
$\rho_{\text{ср}}$	-0,209	1,051	-8,335	-0,0925	-0,113

Как показывают результаты исследований, наибольшее влияние на значение удельного сопротивления оказывает процентное содержание фибры. Так, увеличение процента армирования с 0,5 до 1,5 приводит к падению удельного сопротивления в среднем на 45%.

Также замечено, что увеличение водоцементного отношения с 0,5 до 0,6 приводит к снижению удельного сопротивления в среднем на 36%.

Введение в состав сталефибробетона пластифицирующей добавки ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента позволяет уменьшить удельное электросопротивление смеси в среднем на 25%.

Важное значение при расчете параметров прогревного оборудования имеет величина удельной теплоемкости бетонной смеси, от которой зависит расстояние между электродами, мощность прогревного трансформатора, тип и сечение подводящих кабелей и др.

С целью определения удельной теплоемкости сталефибробетонной смеси была разработана методика и проведены экспериментальные исследования по изучению влияния процента армирования смеси на ее удельную теплоемкость. Опыты показали, что введение в состав бетонной смеси стальных фибр изменяет величину удельной теплоемкости смеси (снижение до 12%). Результаты исследования приведены на рис. 4.

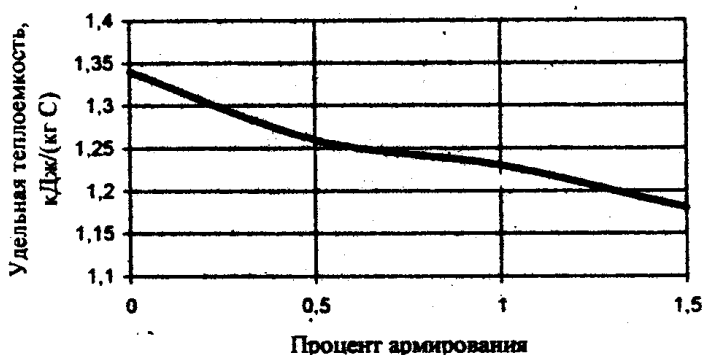


Рис. 4. Влияние процента армирования сталефибробетона на его удельную теплоемкость

С целью изучения влияния температуры разогрева сталефибробетонной смеси на ее удобоукладываемость и прочностные характеристики реализован трехфакторный эксперимент, поставленный с использованием метода математического планирования. В качестве независимых факторов выбраны: водоцементное отношение (X_1), содержание фибровой арматуры (X_2), температура разогрева (X_3).

Уровни факторов и интервалы их варьирования представлены в табл. 4.

Уровни факторов и интервалы их варьирования

Фактор	Единица измерения	Уровни факторов			Интервалы Варьирования
		-1	0	+1	
X ₁	–	0,5	0,55	0,6	0,05
X ₂	%	0,5	1,0	1,5	0,5
X ₃	°С	20	50	80	30

Общеизвестно, что применение предварительного электроразогрева приводит к быстрой потере подвижности смеси и, соответственно, к ухудшению ее удобоукладываемости, а в некоторых случаях и непригодности к дальнейшему использованию. Поэтому в качестве одного из направлений исследований стало изучение влияния предварительного электроразогрева сталефибробетона на его удобоукладываемость (жесткость).

На основе анализа результатов исследований сделан вывод о том, что для обеспечения удобоукладываемости сталефибробетонной смеси, подвергаемой предварительному электроразогреву рекомендуется использовать пластифицирующие добавки. Так, например, использование добавки ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента позволяет уменьшить жесткость разогретой смеси в среднем в 2,6 раза.

После экспериментальной реализации плана проводилась обработка полученных результатов на ЭВМ, в результате чего получены следующие уравнения регрессии для сталефибробетонных смесей с пластифицирующими добавками:

$$Y_4 = 13,58 - 6,5 X_1 + 8,5 X_2 + 6,4 X_3 + 4,74 X_1^2 - 3,75 X_1 X_2 + 0,75 X_1 X_3 + 0,74 X_2^2 + 1,0 X_2 X_3 - 0,76 X_3^2$$

$$Y_5 = 15,55 - 6,7 X_1 + 9,1 X_2 + 8,5 X_3 + 4,29 X_1^2 - 3,88 X_1 X_2 + 0,63 X_1 X_3 + 1,29 X_2^2 + 1,13 X_2 X_3 - 0,71 X_3^2$$

$$Y_6 = 19,14 - 6,6 X_1 + 9,5 X_2 + 10,3 X_3 + 5,25 X_1^2 - 4,13 X_1 X_2 + 1,38 X_1 X_3 - 1,25 X_2^2 + 0,63 X_2 X_3 - 0,25 X_3^2$$

где Y₄, Y₅, Y₆ – жесткость сталефибробетонной смеси, соответственно, сразу, через 15 минут и через 30 минут после приготовления, с;

Прочность бетона является интегральной характеристикой, которая зависит от свойств компонентов бетона, его состава, условий приготовления и твердения.

Сталефибробетон из смеси, подвергнутой термообработке обладает повышенной прочностью, по сравнению со сталефибробетоном из неразогретой смеси. Так, разогрев смеси до температуры 50 °С увеличивает прочность на сжатие и на растяжение при изгибе на 7%, а разогрев до температуры 80 °С увеличивает прочность на сжатие на 12%, при этом прочность на растяжение при изгибе возрастает на 9% по сравнению с прочностью сталефибробетона из неразогретой смеси.

Прочностные свойства сталефибробетона из разогретой и неразогретой смеси с применением пластифицирующей добавки имеют тенденцию к увеличению по отношению к сталефибробетону без добавки.

После обработки полученных результатов на ЭВМ, были получены следующие уравнения регрессии для сталефибробетонов с пластифицирующими добавками:

$$Y_7 = 32,07 - 4,32 X_1 + 2,21 X_2 + 1,78 X_3 + 1,0 X_1^2 - 0,09 X_1 X_2 - 0,31 X_1 X_3 - 0,75 X_2^2 - 0,06 X_2 X_3 - 0,4 X_3^2$$

$$Y_8 = 5,10 - 0,7 X_1 + 0,43 X_2 + 0,22 X_3 + 0,18 X_1^2 - 0,02 X_1 X_2 - 0,18 X_2^2 + 0,05 X_2 X_3 - 0,12 X_3^2$$

где Y_7 – прочность сталефибробетона на сжатие, МПа;

Y_8 – прочность сталефибробетона на растяжение при изгибе, МПа.

Кинетика набора прочности является одной из важнейших характеристик бетонов, по которой определяется время распалубки конструкций, их нагружения и возможного замораживания.

Применение предварительного разогрева сталефибробетонной смеси до температуры 80 °С позволяет получить уже через сутки выдерживания при этой температуре прочность до 74% от проектной, в то время как прочность неразогретого сталефибробетона к этому времени не превышает 18%. Использование пластифицирующей добавки ведет к увеличению прочности сталефибробетона к 24 часам выдержки при повышенных температурах в среднем на 7...10%.

После обработки полученных результатов на ЭВМ были получены следующие уравнения регрессии для сталефибробетонов с пластифицирующими добавками:

$$Y_9 = 3,78 - 0,82 X_1 + 0,09 X_2 + 4,0 X_3 + 0,085 X_1^2 - 0,013 X_1 X_2 - 0,69 X_1 X_3 - 0,17 X_2^2 + 0,09 X_2 X_3 + 0,28 X_3^2$$

$$Y_{10} = 10,89 - 1,69 X_1 + 0,22 X_2 + 9,88 X_3 + 0,54 X_1^2 + 0,013 X_1 X_2 - 1,66 X_1 X_3 + 0,09 X_2^2 + 0,24 X_2 X_3 - 1,51 X_3^2$$

$$Y_{11} = 17,9 - 2,43 X_1 + 0,67 X_2 + 12,32 X_3 + 0,41 X_1^2 - 0,12 X_1 X_2 - 1,6 X_1 X_3 + 0,21 X_2^2 + 0,62 X_2 X_3 - 4,35 X_3^2,$$

где Y_9 , Y_{10} , Y_{11} – прочность сталефибробетона на сжатие, соответственно, через 10, 15 и 24 часа, МПа;

Результаты испытаний образцов на замораживание показывают, что одних суток твердения в условиях нормального хранения достаточно, чтобы в бетоне данного состава сформировалась устойчивая кристаллическая структура и последующее замораживание не отразилось на прочности сталефибробетона.

В тоже время, испытание образцов с пластифицирующей добавкой ЛСТ показало, что критическую прочность они набирают только на вторые сутки твердения в условиях нормального хранения.

Анализ результатов исследования свидетельствует о тенденции к снижению критической прочности сталефибробетона по сравнению с обычным бетоном, при этом, величина сброса прочности в результате раннего замораживания у образцов из сталефибробетона меньше величины сброса прочности образцов из обычного бетона.

В пятой главе на основании анализа результатов выполненных исследований приведен Технологический регламент на производство сталефибробетонных работ как в условиях положительных температур окружающей среды, так и в зимних условиях с термообработкой сталефибробетона. Технологический регламент устанавливает требования к материалам и составу, технологии приготовления, транспортирования, укладки и выдерживания сталефибробетона, контролю качества работ.

Разработки кафедры "Технология строительного производства" ЮУрГУ в области зимнего бетонирования и результаты проведенных автором исследований легли в основу разработанной компьютерной программы для контроля и прогнозирования температурных режимов и прочности сталефибробетона различных конструкций выдерживаемых в зимних условиях.

Описан практический опыт применения сталефибробетона при устройстве дорожной одежды путепровода на месте пересечения автодорог "Челябинск – Харлуши" и "Обход г. Челябинска" и ремонтно-восстановительных работ проезжей части моста через р. Синара на 112 км автодороги "Подъезд к г. Екатеринбург" с использованием рекомендаций Технологического регламента.

Общий объем уложенного сталефибробетона на этих объектах составил $105,7\text{ м}^3$, в том числе $9,5\text{ м}^3$ – с электротермообработкой. Применение сталефибробетона на этих объектах позволило исключить армирование защитного слоя дорожной одежды арматурной сеткой.

Анализ технико-экономических показателей производства сталефибробетонных работ по устройству дорожной одежды показал, что затраты на материалы снижаются на 5%, энергозатраты – на 8%, кроме того снижается трудоемкость производства работ по сравнению с проектным решением.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. В результате проведенных экспериментов по исследованию совместной работы фибры с цементным камнем установлено:

– из всех исследованных типов фибр наилучшими показателями качества сцепления с цементным камнем обладает фибра из стального листа, разработанная в ЮУрГУ и производимая рядом предприятий России. Прочностные характеристики сталефибробетона с использованием этого типа фибр превышает эти же показатели сталефибробетонов, армированных другими типами фибр;

– получена аналитическая модель работы стального волокна при его вытягивании из матрицы. Эта модель позволила получить формулу для определения критической длины фибры, которая оказывает влияние не только на прочностные свойства сталефибробетона, но и влияет на технологические процессы введения фибр в бетонную смесь;

– раннее замораживание свежеложенного цементного теста снижает прочность сцепления с фиброй. Повторное уплотнение оттаявшего цементного теста позволяет восстановить прочность сцепления с фиброй и повысить прочность цементного камня (прирост на 7%);

– в 28-ми суточном возрасте прочность цементного камня образцов, подвергнутых электропрогреву уменьшается на 8%, а подвергнутых предварительному электроразогреву увеличивается на 4% по сравнению с образцами нормального хранения.

2. Разработана методика подбора состава сталефибробетона с учетом влияния на его свойства площади боковой поверхности фибры. Получены уравнения

регрессии и построены графики, позволяющие подбирать и корректировать составы сталефибробетонов по показателям удобоукладываемости и проектной прочности сталефибробетона.

3. Установлена оптимальная последовательность загрузки компонентов сталефибробетона в бетоносмесительные установки.

4. При выполнении контроля качества сталефибробетонных работ необходимо учитывать следующее:

- минимальный вес пробы сталефибробетонной смеси зависит от геометрических характеристик фибры и процента армирования сталефибробетона;

- масштабный коэффициент для сталефибробетонных контрольных образцов имеет более высокие значения, чем у образцов из обычного бетона. Так, для кубов с ребром 100 мм при 1% армирования масштабный коэффициент равен 0,969, а при 1,5% – 0,975.

5. Эффективным технологическим приемом получения сталефибробетонных конструкций с повышенными прочностными характеристиками является послойная укладка смеси.

6. Показано влияние термообработки сталефибробетонной смеси на ее технологические, электрофизические и прочностные свойства. При этом:

- сталефибробетон из смеси, подвергнутой предварительному электронагреву обладает повышенной прочностью (до 12% на сжатие и до 9% на растяжение при изгибе), по сравнению со сталефибробетоном из неразогретой смеси.

- термообработка сталефибробетона при температуре 80 °С позволяет получить через сутки прочность до 74% от проектной, в то время как прочность не прогретого сталефибробетона к этому времени не превышает 18%.

- прочностные свойства сталефибробетона из разогретой и неразогретой смеси с применением пластифицирующей добавки имеют тенденцию к увеличению (в среднем на 2%) по отношению к сталефибробетону без добавки.

- наблюдается снижение критической прочности сталефибробетона по сравнению с обычным бетоном;

- использование добавки ЛСТ в количестве 0,25% от массы цемента позволяет уменьшить жесткость разогретой смеси в среднем в 2...2,5 раза.

- получена формула и построена номограмма для определения расчетного и минимального значений удельного электрического сопротивления сталефибробе-

тонной смеси в зависимости от ее состава (процента армирования и водоцементного отношения).

– введение в состав бетонной смеси стальных фибр приводит к снижению удельной теплоемкости смеси (до 12%). Это приводит к снижению мощности прогревного трансформатора, уменьшению сечения подводящих кабелей, увеличению расстояния между электродами.

8. Разработана компьютерная программа, позволяющая контролировать и прогнозировать температурные режимы и прочностные параметры сталефибробетонных конструкций, выдерживаемых в различных условиях с использованием методов термоса, предварительного электроразогрева и электропрогрева.

9. Разработан Технологический регламент на производство сталефибробетонных работ, описывающий основные технологические приемы приготовления, укладки, термообработки и выдерживания сталефибробетона в конструкциях и обеспечивающий требуемые показатели свойств сталефибробетона. Анализ технико-экономических показателей производства сталефибробетонных работ по устройству дорожной одежды моста с использованием данного Технологического Регламента показал, что затраты на материалы снижаются на 5%, энергозатраты – на 8%, кроме того, снижается трудоемкость производства работ по сравнению с проектным решением.

Основные положения работы изложены в следующих публикациях:

1. Евсеев Б.А., Пикус Г.А., Вострецов Ф.И. Высокопрочная фибра из стального листа с повышенной анкерующей способностью// Международный научно-технический симпозиум "Применение сталефибробетона в транспортном строительстве". – М.: Трансстрой, 1998. – С.15.

2. Тепловая обработка свежееуложенного сталефибробетона при отрицательных температурах/ С.Г.Головнев, Б.А.Евсеев, С.Б.Коваль, М.В.Молодцов, Г.А.Пикус// Там же. – С.14.

3. Влияние электротермообработки на удобоукладываемость сталефибробетонной смеси/ С.Г.Головнев, Б.А.Евсеев, С.Б.Коваль, Г.А.Пикус// Материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза: Пензенская государственная архитектурно-строительная академия, 1999. – С.94-95.

4. Разработка составов фибронабрызгбетона для крепления обводненных и нарушенных участков скальных грунтов "мокрым" и "сухим" способами беонирования для Челябинского метрополитена: Отчет о НИР / Южно-Ур. гос ун-т, Челябинск; Б.А.Евсеев, С.Б.Коваль, Г.А.Пикус, М.В.Молодцов, Д.П.Зябликов, № ГР 01.9.80 003280; Инв. № 029.80 002731, 1998.

5. К вопросу о жесткости сталефибробетонных смесей/ С.Г.Головнев, Б.А.Евсеев, С.Б.Коваль, Д.П.Зябликов, М.В.Молодцов, Г.А.Пикус; Южно-Ур. гос ун-т, Челябинск, 1998. – 4 с.: библиогр. – 6 назв./Деп. в ВНИИТИ 25.08.98 № 264М – В 98.

6. Особенности электротермообработки монолитных конструкций из сталефибробетона/ С.Г.Головнев, Б.А.Евсеев, С.Б.Коваль, Д.П.Зябликов, М.В.Молодцов, Г.А.Пикус; Южно-Ур. гос. ун-т, Челябинск, 1998. – 8 с.: ил.3. библиогр. – 3 назв./Деп. в ВНИИТИ 15.04.98 № 1151 – В 98.

7. Пикус Г.А., Евсеев Б.А., Головнев С.Г. Исследование влияния раннего замораживания на прочность сталефибробетона// Известия вузов. Строительство. – 2000. № 7–8. –С.133–135.



Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 31.10.2000 Формат 60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1
Тираж 80 экз. Заказ 424/450.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.