



МАТЕРИАЛЫ

ФИБРОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН «ВСМ-БЕТОН» ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Каждому новому витку технического прогресса предшествует непрерывный поиск новых прорывных технологий. В современной строительной индустрии усилия исследователей направлены, прежде всего, на повышение технологических и эксплуатационных свойств бетонных и сталежелезобетонных конструкций, где новые эффективные решения требуют использования различных органических и неорганических соединений в качестве специальных добавок нового поколения для дисперсного армирования бетона.

Транспортный строительный комплекс играет значительную роль в социально-экономическом развитии любой страны, являясь важным фактором стабильности. Переход в «эпоху композиционных материалов» диктует условия для систематического выявления факторов, определяющих повышение технологических и эксплуатационных свойств бетонных и сталежелезобетонных конструкций транспортных сооружений, а также возможности их регулирования. При этом проблема повышения качества и долговечности может быть успешно решена путем создания новых прикладных технологий модифицирования бетонов.

На современном этапе развития бетоноведения указанные задачи решают путем использования различных органических и неорганических соединений в качестве специальных добавок нового поколения для дисперсного армирования бетона.

Цементный бетон имеет определенные специфические свойства, характеризующие его как хрупкое твердое тело. Предельные деформации бетона при растяжении существенно ниже, чем при сжатии. В этой связи наиболее востребованными становятся дисперсные модифицирующие компоненты для армирования цементной матрицы.

Исходя из принципов создания прочных фибробетонных композитов, упрочненных не

только в макрообъеме, но и в микрообъемах с оптимальной степенью дискретного распределения волокон, выявлено, что прочность фибробетонов при растяжении зависит от среднего расстояния между волокнами, от их длины и степени армирования. Это положение является чрезвычайно важным и перспективным, если говорить о фибробетонах высокой прочности в случае использования микроволокон при условии обеспечения надежного сцепления их с матрицей.

На основании аналитических исследований на стыке физической химии, коллоидной химии, поверхностных явлений, возникающих на границе раздела фаз, и механики разрушения гетерогенных систем сформулированы основные требования к разрабатываемой серии дисперсно-армирующих волокон, обладающих качествами модификаторов комплексного воздействия на свойства цементно-полимерных композитов.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ КОМПОНЕНТНОЙ ДОБАВКИ ВСМ™

В ходе экспериментально-теоретических исследований, относящихся к дисперсному модифицированию цементных систем, выделено и обосновано два функциональных направления модифицирующей компонентной добав-

А. А. САВЕЛЕВ, инженер «Си Айрлайд» (Челябинск)

Е. А. АНТРОПОВА, кандидат технических наук

И.А. БЕГУН, кандидат экономических наук, ОАО «ЦНИИС»

В.Г. РЕШЕТНИКОВ, кандидат технических наук ГИП, ОАО «Союздорпроект»

ки ВСМ™, объединяющей функции структурообразования при гидратации и твердении и основную функцию – армирование цементной матрицы. Перспективность этого направления определила необходимость решения специальных задач: направленное модифицирование поверхности волокна и технология высокоориентированных полимерных структур волокна. В процессе производства волокна подвергаются химической, физической и композитной модификации с целью обеспечения необходимой механической прочности и химической реакционной активности поверхности волокна. Эти задачи решаются на основе теории трещин Ирвина и Орована, Баренблата и Панасюка с учетом напряженно-деформационного состояния цементной матрицы и эффективных концентраций волоконных микроармирующих компонентов, исключая хрупкое разрушение и повышающих сопротивление зарождению и распространению трещин в бетоне.

Научно-практический интерес в строительстве представляет такой технологический процесс производства дисперсного волокна, который предусматривает направленную физическую, химическую и композитную модификацию с целью придания механической прочности волокну и химической реакционной активности поверхности волокна к продуктам гидратации цемента. В частности, строительным холдингом «Инси» и научно-производственной компанией «Си Айрлайд» г. Челябинска предложен метод модификации цементных систем полифункциональным волокном – «ВСМ-Бетон», обеспечивающим участие в процессах гидратации, структурообразования и армирования цементной матрицы. ВСМ™ представляет собой полимерные фибриллированные волокна (фибры) длиной 1,5, 3,0, 6, 12 и 18 мм, диаметром 18–25 мкм, подготовленные для комплексной модификации и армирования структуры матрицы композиционного материала.

КОАКСИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПОЛИМЕРНОГО ВОЛОКНА «ВСМ-БЕТОН»

Результатом научно-исследовательской работы стало создание коаксиальной структуры полимерного волокна «ВСМ-Бетон», состоящего из прочного и жесткого ядра и активной оболочки, вступающей в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента (рисунок 1).

В качестве ядра используются полимеры с высокой прочностью и низкой деформативностью или подвергнутые различным видам модификации (физической, композиционной), которые позволяют получить особо прочную фибриллированную высокоориентированную структуру, выполняющую функцию стержневой несущей составляющей волокна.

Значительную роль в процессах структурообразования играет энергетическое состояние поверхности армирующих волокон ВСМ™, определяющее контактную зону в системе «вяжущее – волокно». С целью усиления адгезии волокон и вяжущего и повышения их структурообразующей роли разработаны различные методы модификации поверхности волокна, главными из которых является композитное и химическое модифицирование введением в расплав оболочки активных составляющих.

Армирующие волокна серии ВСМ™ разрабатывали с учетом строения и химии поверхности, которая формируется под воздействием физико-химических процессов в активных органических и минеральных добавках на вещество матрицы.

В данном аспекте применена теория гидратации и твердения вяжущих по донорно-акцепторному механизму, основанная на теории строения твердых тел, дисперсий их поверхностей, глубоко разработанная в работах [1, 2]. В ней заложены энергетические и термодинамические условия взаимодействия в вяжущих системах, дающие представления о движущих силах, обуславливающих

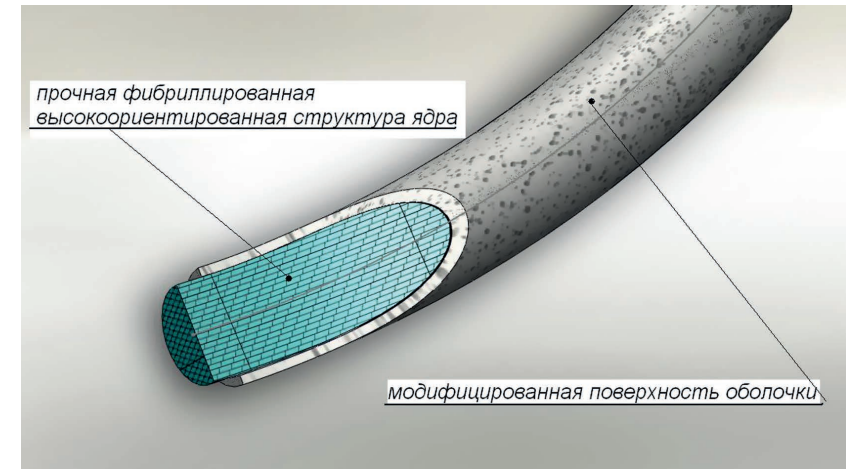


Рис. 1. Коаксиальная структура полимерного волокна «ВСМ-Бетон» состоит из прочного жесткого ядра и активной оболочки, вступающей в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента

Модифицирующая компонентная добавка ВСМ™ объединяет функции структурообразования при гидратации и твердении, а также функцию армирования цементной матрицы.

смысл современных технологий бетона. Это теоретическое положение в последние годы получило убедительное практическое развитие в технологии бетона, модифицированного полимерной фиброй ВСМ™.

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКИХ ГРАДИЕНТОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Разработан технологический регламент получения наиболее плотной наполняемости поверхности и концентрации молекулярных кластеров в привитом слое. Органические модификаторы оболочки содержат активные функциональные группы (одну или несколько полярных групп типа гидро-амино-карбоксигрупп –ОН, –СООН, NH₂ (рисунок 2), моно- или поликарбоновых, метакриловых кислот, способных реагировать с цементными минералами и продуктами их гидратации.

Созданный гомо- и гетерогенный поверхностный молекулярный структурный ансамбль из молекулярных образований (рисунок 3) представляет значительный научный интерес как развиваю-



Рис. 2. Органические модификаторы оболочки содержат активные функциональные группы моно- или поликарбоновых, метакриловых кислот, способных реагировать с цементными минералами и продуктами их гидратации

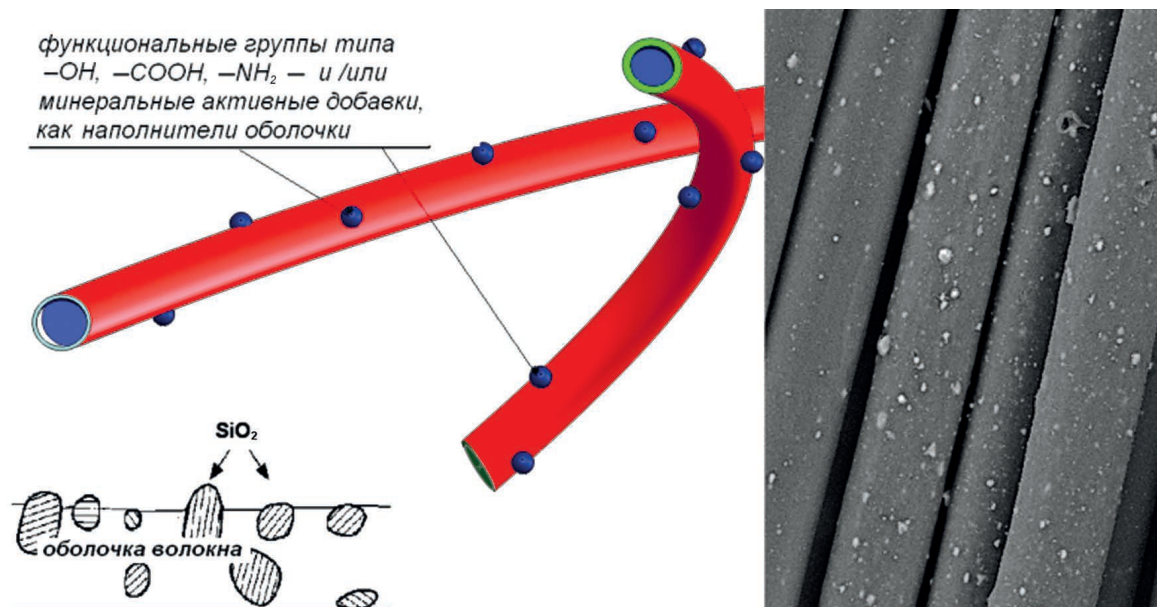


Рис. 3. Гомо- и гетерогенный поверхностный молекулярный структурный ансамбль из молекулярных образований

щийся метод, позволяющий сформировать высокие градиенты поверхностных характеристик и разнообразный структурный и молекулярный «дизайн» на микро- и макромолекулярном уровне. Кроме перечисленных специализированных полимеров и веществ-аддитивов в части производимых волокон используют композитный способ модификации оболочки.

Сущность этого метода основана на введении пуццолановых наполнителей в оболочку и поверхность волокна. В качестве одного из основных модифицирующих компонентов-наполнителей используется микрокремнезем, позволяющий связать гидратную известь в гидросиликатную матрицу. При формировании структуры модифицированного бетона следует отметить эффективную роль добавки ультрадисперсно-аморфного кремнезема (МК). Предпочтение в выборе минеральных активных добавок как наполнителя оболочки было

сформировано на анализе существующих разработок «Об эффективности применения минеральных добавок» и на их способности воздействовать на процесс гидратации [1, 2]. Наполненная оболочка волокна – композиционный материал с непрерывной полимерной фазой, в которой в определенном порядке и количестве распределены ультрадисперсные частицы микрокремнезема.

Располагаясь на поверхности волокна в инициативном состоянии, концевые функциональные группы и поверхности неорганических добавок воздействуют на процесс гидратации, формируя сростки кристаллогидратов вдоль всего волокна. Повышенная концентрация кристаллогидратов вблизи поверхности раздела фаз (волокно – цементный камень) обеспечивает прочное сцепление волокна в цементных средах.

Значения абсолютных величин межфазной и контактной поверхностей, ее энергетической

плотности и пуццолановой активности определяют приоритетность технологии.

Удельная поверхность волокон, их привитые кислотно-основные центры и неорганические ультрадисперсные частицы как носители внутренней энергии рассматривают в качестве интенсивного признака твердеющей системы, в которой концентрируются структурообразующие элементы этой дисперсной системы.

Параметры структурно-дисперсного распределения волокна в объеме цементной матрицы определены в зависимости от концентрации волокна в объеме и геометрических параметров самих волокон. Так как волокна, являющиеся носителями активных центров, имеют протяженную структуру и распределены в объеме бетона равномерно, то при оптимальной дозировке они обеспечивают многоуровневую компоновку структуры, запуская механизм самоармирования. Преобладание в структуре

Характерным отличием бетонов, модифицированных ВСМ™, является высокая удельная поверхность контакта между цементной матрицей и армирующими волокнами.

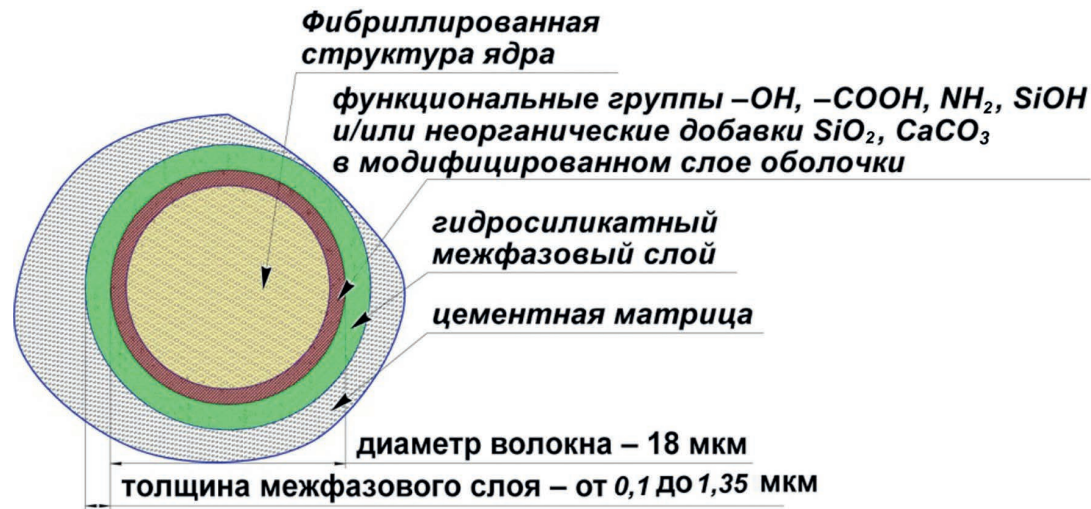


Рис. 4. Параметры структурно-дисперсного распределения волокна в объеме цементной матрицы определены в зависимости от концентрации волокна в объеме и геометрических параметров самих волокон

цементного камня дисперсных и устойчивых гидросиликатов является причиной повышения прочности и плотности фаз кристаллизационной структуры и определяет долговечность связи с фазовыми и поровыми параметрами структуры цементного камня.

Характерным отличием бетонов, модифицированных ВСМ™, является высокая удельная поверхность контакта между цементной матрицей и армирующими волокнами. Результаты исследований приводят к выводу, что микроармирующие волокна диаметром 20 мкм могут увеличивать предел упругости и прочности бетона. В результате перекрывания микротрещин, а затем, после растрескивания, и макротрещин, волокна обеспечивают увеличение пиковых и остаточных пределов прочности при заданных прогибах. На данной стадии значение приобретает работа цементной матрицы, в которой равномерно распределены волокна с регулируемой адгезионной прочностью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные экспериментальные исследования и практическое использование результатов исследований и разработок модифицирующих волокон ВСМ™ на десятках предприятий свидетельствуют о большой научно-практической ценности работы: выполнены подборы составов бетонов с применением ВСМ™ и оценкой действия волокна на изменение свойств морозостойкости. Бетонные смеси изготавливали с подвижностью П2–П4. Испытания проводили в лабораторных и производственных условиях без применения воздухововлекающих и иных добавок. При этом показатели качества бетонов с волокном по трещиностойкости, морозостойкости и водонепроницаемости превысили величины, заданные проектом.

Достоинством модифицирующей добавки ВСМ™ с функцией армирования цементного

камня является представленное в ней комплексное решение прикладных задач, связанных с созданием строительных композитов с высокими эксплуатационными свойствами:

- упрочнение бетонов, достигаемое перераспределением дифференциальной пористости цементного камня в сторону меньших по размеру гелевых пор, что обуславливает формирование цементного камня с меньшим количеством капиллярных пор;

- ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с активизированными волокнами, где привитые функциональные молекулярные кластеры служат центрами кристаллизации;

- образование гидросиликатных кластеров «вяжущее – волокно» за счет высокой поверхностной энергии активных молекул на поверхности волокон и упрочнение контактной межфазовой зоны между цементным камнем и поверхностью волокна.

Армирующий модификатор ВСМ™ удовлетворяет требованиям ТУ 2272-006-1349727-2013, обеспечивает соответствие европейскому стандарту EN [3] в части требований для полимерных волокон конструкционного назначения в бетонах и строительных композитах для увеличения прочности при изгибе.

Помимо основного эффекта действия – устанавливающий комплекс ключевых функций ВСМ™, для выполнения которых они предназначены, волокна обеспечивают дополнительный эффект, проявляющийся в модификации огнезащитных свойств бетона. В настоящее время в Европе руководствуются европейским стандартом EN [4].

В техническом кодексе рассматриваются методы пассивной противопожарной защиты, распространяемые на проектирование конструкций, которые должны выполнять требуемые функции (несущую и/или ограждающую) в течение установленной продолжительности регламентированного воздействия пожара при заданном уровне

Достоинство модифицирующей добавки ВСМ™ с функцией армирования цементного камня придает реализованное в ней комплексное решение прикладных задач, связанных с созданием строительных композитов с высокими эксплуатационными свойствами.

Проведенные испытания доказывают, что использование тонкого полипропиленового волокна снижает вероятность взрывного откалывания при воздействии огня, при этом включение макроволокон из стали или полиолефина не оказывают существенного влияния на процесс взрывного откалывания

нагрузки. Для бетонов класса более В40 характерно хрупкое разрушение бетона при пожаре, и для защиты должно быть применено действие, исключаящее и/или снижающее вероятность хрупкого разрушения. Одним из эффективных рекомендуемых методов является добавление в бетонную смесь полипропиленовых волокон (метод D) неконструкционного назначения.

Было доказано, что использование тонкого полипропиленового волокна снижает вероятность взрывного откалывания при воздействии огня. Проведенные испытания доказывают, что включение макроволокон из стали или полиолефина не оказывает существенного влияния на процесс взрывного откалывания, который происходит при воздействии огня по условиям, изложенным в стандартах [5] и [6]. Высокая эффективность микроволокон «ВСМ» является следствием большого количества волокон в единице объема, около $300 \cdot 10^6 \div 240 \cdot 10^6$ на кубический метр бетонматрицы, против $20 \cdot 10^3 \div 30 \cdot 10^3$ при использовании крупного волокна.

Результаты натурных стендовых огневых испытаний бетонных перекрытий позволили оценить дополнительный эффект дисперсно-армирующей модифицирующей добавки серии ВСМ™ на прочность при статическом нагружении и огнестойкие показатели бетонов. Последнее качество позволяет использовать фибру ВСМ™ в бетонах для конструкций тоннелей и метрополитенов.

В прикладной технологии микроармирования ВСМ™ сконцентрированы достижения современного материаловедения и эффективных инновационных и технологических решений. Значение имеет производство дисперсно-армированных высокопрочных бетонов, которые, в том числе и в России, начинают активно использоваться, что вызывает необходимость экспериментально-теоретического обоснования армирующего волокна для модификации бетонов и подготовки нормативно-технической документации для внедрения в производство результатов работы.

РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРИМЕНЕНИЮ И ОЖИДАНИЯ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Полимерные волокна типа «ВСМ-Бетон» рекомендуется использовать при изготовлении конструкций для объектов транспортного строительства с целью повышения их трещиностойкости, коррозионной стойкости, водонепроницаемости и морозостойкости, выносливости под многократно-повторными воздействиями и других физико-механических свойств, определяющих их долговечность. С этой целью строительным холдингом «Инси» и научно-производственной компанией «Си Айрлайд» г. Челябинска совместно с ОАО «ЦНИИС» разработан нормативный документ вида стандарта организации СТО [7] для объектов транспортного строительства. В СТО изложены технические требования к материалам конструкций и составам фибробетонных смесей с использованием полимерной фибры ВСМ™, технологии применения в цементных бетонах и растворах при производстве бетонных и железобетонных работ, в том числе с учетом применяемой механизации.

При этом ФБ-бетон с фиброй ВСМ™ применяют без пластифицирующих и модифицирующих добавок. В СТО представлены физико-механические характеристики фибробетонов и сталефибробетонов в сравнении с требованиями действующего в мостостроении стандарта предприятия [8]. Даны нормативные значения расчетных сопротивлений при сжатии и растяжении в зависимости от класса фибробетона и процента армирования полимерными волокнами типа «ВСМ-Бетон». В таблицах СТО представлены расчетные значения толщины промышленных полов и аэродромных покрытий под нагрузками европейского уровня в зависимости от класса ФБ и процента армирования фиброй «ВСМ-Бетон» с учетом расхода фибры и соответствующего количества фибр в бетонной смеси [9].

В приложениях СТО представлены:

– статистические характеристики распределения параметров: призмная прочность, модуль

Сравнение варианта с применением фибробетонной плиты с полимерной фиброй «ВСМ-Бетон» со стальной фиброй «Харекс» показало существенно меньшие затраты в первом случае, что связано с большим расходом стальной фибры, а также с применением в сталефибробетоне антикоррозионной добавки ЦМИД-4.

упругости и коэффициент Пуассона для ФБ-бетона с расходом фибры: 0,9 кг/м³, 1,0 кг/м³, 1,1 кг/м³;

– линия регрессии выносливости ФБ-бетона на базе 2 млн циклов с коэффициентом корреляции $r = 0,89$, которая позволяет внести соответствующие изменения в стандарт предприятия [7] по расчету на выносливость фибробетонной плиты сталежелезобетонных пролетных строений [9];

– экспериментальные зависимости напряжений от деформаций $\sigma-f(\varepsilon)$ для использования деформационной расчетной модели в расчетах несущей способности плиты по I и II предельному состоянию по ГОСТ Р 52751 [10];

– в СТО представлена Инструкция по технологии применения полимерной добавки «ВСМ-Бетон» в бетонах и растворах при производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Эффективность использования полимерной фибры «ВСМ-Бетон» определена по методике [11] с использованием оценки по приведенной стоимости конструкций (с учетом эксплуатационных затрат). В результате сравнения вариантов приведенные затраты по варианту с фибробетонной плитой с полимерной фиброй «ВСМ-Бетон» оказались меньше затрат по варианту со стальной фиброй «Харекс» на 91 294 руб. в год (на 94 %). Такой результат получен за счет большего расхода стальной фибры (60 кг/м³), чем полимерной фибры «ВСМ-Бетон» (0,9 кг/м³), а также применения в сталефибробетоне антикоррози-

Физико-механические параметры фибробетонов и сталефибробетонов

Параметр, в т. ч. во времени; обозначение и размерность	Бетономатрица класс В40 по СП 35.13330-2011 без фибры	Полимерная фибра SCOTCHCAST™ (США) по СТО 11502704-001-2010 Расход фибры 14 кг/м³	Стальная фибра по ГОСТ Р 52751-2007 «Харекс» (Миксарм) Расход фибры 60 кг/м³	Полимерная фибра ArmaFiber® ООО «Армалекс» (Москва) Расход фибры 10 кг/м³ Обозначение серии			Полимерная фибра «ВСМ-Бетон» (г. Челябинск). ООО «Си-Айрлайд» Расход фибры кг/м³		
				GPP	WPP	MPP	0,9	1,0	1,1
1. Прочность на сжатие (кубиковая), МПа:									
– на 3–4 сут.	18	35	19(39)	39,0	46,1	41,0	54,4	–	–
– на 7 сут.	31	45,6	43(45)	53,7	54,6	43,0	64,4	56	51
– на 28 сут.	50	55,1	55 (58)	60,1	62,9	52,0	68,7	70	60
– на 63–70 сут.	–	69,4	–	71,9	–	–	–	–	–
2. Прочность на сжатие (призменная), МПа	30	39	42 (47)	48	45	38	50	53,4	48,1
3. Прочность на растяжение при изгибе (на раскалывание), МПа	3,0	4,75	6,0 (8,0)	5,8	5,4	4,3	4,5	5,2	5,0
4. Деформация растяжения $\epsilon_n \cdot 10^{-5}$, МПа⁻¹	15	48/166 ^{*1}	30 (54) ^{*1} /105 (183) ^{*1}	81,6	70	52	60	55	61
5. Модуль упругости на сжатие $E \cdot 10^{-3}$, МПа	36	30	38(36)	42,4	39,0	32,5	40,6	37,1	37,1
6. Водонепроницаемость μ	W8	W16-18	W12(18)	> W20			> W12	–	–
7. Коэффициент Пуассона ν (μ)	0,2	0,18	0,22 (0.20)	0,26	0,23	0,23	0,2	0,19	0,15
8. Усадка свободная $\epsilon \cdot 10^4$	5,0	4,8–6,5 ^{*2}	2,5	3,2	–	–	3,8	–	–
9. Мера ползучести $C_p \cdot 10^6$ МПа⁻¹	67	48	21,2	49	–	–	49	–	–
10. Выносливость на моделях^{*3}, млн циклов	1,4 ^{*3}	>2 ^{*3}	>2	>2	>2	>2	>2	–	–
11. Морозостойкость	F300	F200	F300	F300			F300	–	–

*1 Деформации по тензорезисторам.

*2 Фибробетон с фиброй ВСМ™ – без добавок, остальные фибробетоны – с добавкой ЦМИД-4.

*3 Состав бетона кл. В40 без фибры подобран на предприятии МОКОН ОАО «Мостотрест».

онной добавки ЦМИД-4 для увеличения сцепления стальной фибры с бетономатрицей (расход 20 кг/м³, стоимостью более 30 руб/кг).

В связи с положительными прогнозами намечено применять фибробетон с полимерной фиброй ВСМ™ в плите сталежелезобетонного пролетного строения путепровода на 258 км и в плите сталежелезобетонного пролетного строения моста на 190 км трассы Москва – Санкт-Петербург. Оба объекта запроектированы ОАО «СОЮЗДОРПРОЕКТ». При этом намечено использование смешанного армирования (полимерная фибра «ВСМ-Бетон» + стальная фибра с расходом 30–40 кг/м³). Проведенные в ИЦ «ЦНИИС-ТЕСТ» ОАО «ЦНИИС» эксперименты подтвердили эффективность и экономичность такого решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сватовская Л.Б., Сычев М.М. Активированное твердение цементов. Л.: Стройиздат, 1983. 160 с.
2. Комохов П.Г., Сватовская Л.Б., Шангина Н.Н. Роль донорно-акцепторных центров поверхности твердых фаз в нанотехнологии бетона. Л.: Стройиздат, 1983.
3. EN 14889-2:2006 «Волокна для армирования бетона. Часть 2. Полимерные волокна».
4. EN 1992-1-2:2004 «Проектирование железобетонных конструкций. Части 1–2. Общие правила определения огнестойкости».
5. ГОСТ 30247.0-94 «Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования».
6. ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции».
7. СТО 13429727-001-2013 «Конструкции фибробетонные с использованием полимерных волокон «ВСМ-Бетон» для объектов транспортного строительства. Технические условия».
8. СП 35.13330-2011 «Мосты и трубы».
9. А.А. Савельев. Волокно строительное микроармирующее (ВСМ™). Международная выставка «Мир бетона-2013». Доклад от компании «СИ Айрлайд», входящей в производственный холдинг «ИНСИ». Лас-Вегас (США), 5–8 февраля 2013 г.
10. В.Д. Потапов, Е.А. Антропова, А.И. Фимкин, И.А. Бегун. Исследование параметров сталефибробетонных конструкций под воздействием многократно-повторных нагрузок. Вестник МИИТа. Научно-технический журнал. Выпуск 14. М., 2006. С. 108–115.
11. ГОСТ Р 52751-2007 «Плиты из сталефибробетона для пролетных строений мостов. Технические условия».
12. Докт. техн. наук А.А. Цернант, канд. экон. наук И.А. Бегун, канд. техн. наук Е.А. Антропова (ОАО ЦНИИС). Оценка эффективности сталефибробетонных конструкций в эксплуатационный период // Транспортное строительство, №10, 2004.С. 31–32.