Соловьёв В.Г., Шувалова Е.А., Морозов И.В., Золотарев М.Е.
Особенности применения фиброволокна в бетонных конструкциях

*Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/sr-10-04-2019-79

idsp: sciencerussia-10-04-2019-79

Аннотация

Одним из способов повышения долговечности бетонных и железобетонных конструкций при динамических и атмосферных воздействиях является дисперсное армирование бетонной матрицы при помощи фиброволокна. В статье рассмотрены физико-механические характеристики различных видов фибры: высокомодульной (стальной, стеклянной, базальтовой) и низкомодульной (полипропиленовой), а также особенности их применения, особенности их работы и влияние на прочностные характеристики бетонных конструкций.

Ключевые слова: дисперсное армирование, фибробетон, высокомодульная фибра, низкомодульная фибра, стальная фибра, стекловолокно, базальтовое волокно, полипропилен.

Одной из основных задач современной строительной отрасли является оценка ресурса несущих строительных конструкций, а так же продления срока их эксплуатации. Одним из самых востребованных материалов в строительной сфере остаётся бетон. Большинство бетонных и железобетонных конструкций в течение эксплуатации подвергаются различным видам динамического и атмосферного воздействия. Дорожные и аэродромные плиты, шпалы, мостовые конструкции испытывают динамическую нагрузку от подвижного состава, сваи в процессе забивки воспринимают ударные нагрузки, фундаменты под оборудование в промышленных зданиях – ударные и вибрационные нагрузки. В качестве атмосферного влияния стоит отметить воздействие знакопеременных температур и водных агрессивных сред. В результате воздействия на бетон негативных факторов происходит накопление повреждений на микроуровне, дальнейшее развитие которых приводит к образованию трещин, снижающих расчётное сечение конструкций и, как следствие, их несущую способность, что может привести в дальнейшем к разрушению.

Для повышения долговечности бетонных и железобетонных конструкций ведутся разработки по получению эффективных строительных материалов, которые могут компенсировать главные недостатки бетона: низкую прочность при растяжении и хрупкость разрушения. Одним из таких материалов может служить фибробетон.

Фибробетон это композиционный материал, дисперсно армированный волокнами различной длины, свободно ориентированными в объёме бетона. В качестве армирующего компонента применяют высокомодульные (стальные, минеральные) и низкомодульные (синтетические) волокна. Для их эффективной работы в качестве армирующего компонента они должны отвечать ряду требований: поверхность фибры должна быть по возможности профилированной, что обеспечивает лучшую адгезию с бетоном; оптимальное отношение между длиной и диаметром волокна должна составлять

$l/d = 60...100$, поскольку увеличение отношения l/d может привести к комкованию волокон и ухудшению армирующего эффекта; объёмная концентрация должна быть достаточной для достижения объёмно-пространственной целостности структуры фибробетона [1].

Для производства дисперсно-армированных бетонов в качестве вяжущего в основном используется портландцемент. Растворы на основе портландцемента имеют щелочную среду. В качестве продуктов гидратации цемента образуются гидросиликаты и гидроксид кальция, которые определяют свойства цементного камня и влияют на физико-механические характеристики отдельных видов волокон.

В современной технологии изготовления фибробетонов в качестве высокомодульной фибры наиболее часто используемые стальные, стеклянные и базальтовые волокна. В качестве низкомодульной фибры – полипропиленовые. Рассмотрим особенности их применения.

Современным аналогом арматуры при изготовлении строительных конструкций является стальная фибра, которая бывает разных типов в зависимости от вида материала, конфигурации и размера. За счёт применения стальной фибры можно снизить трудоёмкость изготовления железобетонных конструкций и расход стали, а также упростить армирования элементов сложной конфигурации. Производство предполагает получение следующих видов фибры: проволочная, листовая, фрезерованная и токарная. Исследования показали, что наиболее эффективна в применении проволочная фибра, выполненная из малоуглеродистой стали. При её применении прочность конструкции на сжатие увеличивается на 50%, на растяжение при изгибе – на 200%, на растяжение при раскалывании – на 140%, а также отмечена вязкая пластическая работа бетона под нагрузкой [2]. Благодаря высоким физико-механическим характеристикам, сталефибробетон может применяться в несущих изгибаемых и тонкостенных конструкциях, дорожных и аэродромных плитах и т. д. Однако, стальная фибра не универсальна и обладает рядом недостатков: как и стальная арматура, она подвержена коррозии, что снижает несущую способность конструкций, а расход стали приводит к их удорожанию. Кроме того, стальная фибра обладает значительной электропроводностью, что ограничивает её применение для конструкций, в которых возможно наличие блуждающих токов при их эксплуатации, например, железнодорожных шпал.

Стеклянная фибра – волокно, экструдированное из расплава стекла специального химического состава. В такой форме стекло не бьётся, а легко гнётся без разрушения. Диаметр волокон составляет 3-100 мкм. Физико-механические и химические свойства фибры зависят от технологии её изготовления и выбора сырьевых материалов. В настоящее время наиболее часто применяют стекловолокна следующих марок: Е-стекло (низкой электрической проводимости), S-стекло (высокой прочности), AR-стекло (высокой щёлочестойкости). Около 90% выпускаемых стекловолокон это волокна марки Е. Их прочность при разрыве составляет 3100-3800 МПа, модуль упругости 76-81 ГПа [3]. Данный тип волокон является наиболее экономичным и соответственно наиболее распространённым. Стекловолокно марки S характеризуется высокими механическими значениями: прочность при разрыве составляет 4500-4800 МПа, модуль упругости – 86-87 ГПа [3]. Однако, широкое применение стекловолокон в качестве армирующего компонента в бетонных конструкциях ограничивается по причине их слабой устойчивости к воздействию среды гидратирующихся портландцементов. Так, образующийся гидроксид кальция, взаимодействуя с компонентами стекла, приводит к разрушению стекловолокна по причине выщелачивания и разрушения его кремнекислородного каркаса. В настоящее время разработаны специальные составы щёлочестойких стеклянных волокон - марки AR, содержащие оксид циркония. Прочность при разрыве AR-волокон уступает волокнам марок Е и S и составляет 1500-1700 МПа, модуль упругости равен 72-74 ГПа [3]. Но, не смотря на высокую стойкость к кислым и щелочным средам, они получили меньшее распространение на строительном рынке за счёт дефицитности и дороговизны

цирконийсодержащего сырья. Стоит отметить, что все марки стекловолокна имеют высокую диэлектрическую постоянную.

Также, среди высокомодульных волокон можно выделить базальтовые волокна, получаемые на основе расплава базальта, который является наиболее распространённой и доступной горной породой. Базальтовые волокна обладают высокими физико-механическими характеристиками, коррозионной стойкостью, повышенной адгезией к цементному камню, экологической безопасностью, а также, как и стеклянные волокна, они являются диэлектриками. Кроме того, большинство исследований относят базальтовые волокна к числу щёлочестойких на основе данных потери прочности после выдерживания в растворе щёлочей. Механические характеристики базальтовых волокон сравнимы со стекловолокном марки E, но значительно уступают высокопрочному стекловолокну марки S: прочность при разрыве составляет 1600-3200 МПа, модуль упругости равен 100-130 ГПа [4].

Низкомодульная синтетическая фибра представляет собой химически синтезируемые волокна при помощи технологий полимеризации, поликонденсации, карбонизации и др. Низкомодульные волокна характеризуются повышенной деформативностью и, в отличие от высокомодульных волокон, не увеличивают прочностные характеристики бетона при статических нагрузках, однако улучшают сопротивление материала при динамических нагрузках, уменьшают усадочные деформации в бетоне. Кроме того, синтетическая фибра является инертной по отношению к продуктам гидратации цемента и имеет малый вес. Различают арамидные, акриловые, нейлоновые, полиэтиленовые, полипропиленовые полиамидные волокна и т. д. Синтетические волокна, как правило, применяют для объектов транспортного строительства, при устройстве бетонных полов, стяжек. Наибольшее распространение получили полипропиленовые волокна за счёт относительно невысокой стоимости и хороших физико-химических и прочностных свойств: химическая стойкость, теплостойкость, прочность при растяжении составляет 400-770 МПа, модуль упругости 3,5–8,0 ГПа. Однако, полипропиленовые моноволокна обладают низкой морозостойкостью, что ограничивает область их применения. Температура хрупкости колеблется от -5 до -15°C. В целях улучшения физико-механических показателей выпускается модифицированная полипропиленовая фибра. Исследования показывают, что введение модифицированного полипропиленового волокна «ВСМ-Бетон» (Патент № 2396379, Патент № 2339748) фирмы-производителя ООО «Си Айрлайн» (г. Челябинск) позволяет повысить ударную вязкость бетона более, чем в 3 раза по сравнению с неармированной бетонной матрицей; снижает усадочное трещинообразование; повышает прочность бетона на сжатие до 36,8% в возрасте 28 суток; марка по морозостойкости соответствует марке F300, а марка по водонепроницаемости соответствует марке W12 [5].

Основные физико-механические характеристики рассмотренных типов фиброволокон представлены в таблице 1 [2,3,4].

Таблица 1.

Основные физико-механические характеристики разных типов фибры

Тип фиброволокна	Плотность, г/см ³	Прочность на растяжение, R, МПа	Модуль упругости E _f , ГПа	Удлинение при растяжении, %
Стальная фибра проволочная из малоуглеродистой стали	7,8	540-580	200	3-4
Стекловолоконно марки E	2,54-2,62	3100-3800	76-81	1,5-3,5
Стекловолоконно марки S	2,48-2,49	4500-4800	86-87	

Стекловолокно марки AR	2,6-2,7	1500-1700	72-74	
Базальтовое волокно	2,67	1600-3200	100-130	1,4-3,6
Полипропиленовое волокно	0,9	400-770	3,5-8,0	10-25

Сравнивая различные виды фибры нельзя сделать однозначного вывода о преимуществах одного типа волокон над другими. В зависимости от применяемого типа фибры, фибробетоны обладают различными физико-механическими характеристиками: для фибробетонов на высокомодульных волокнах характерны повышенные прочностные показатели при сжатии и растяжении, а также более высокий модуль упругости композита, фибробетоны на низкоимодульных волокнах характеризуются повышенной вязкостью разрушения, ударной прочностью, морозостойкостью, коррозионной и химической стойкостью. Таким образом, к вопросу выбора типа фибры необходимо подходить комплексно, учитывая особенности работы самой конструкции, типа нагрузки, действующей на неё, а также специфику среды её эксплуатации.

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография – М.: Издательство АСВ, 2011. – 642 с.
2. Талантова К.В., Михеев Н.М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций / К.В. Талантова, Н.М. Михеев // Ползуновский вестник. – 2011. - № 1. – С. 194-199.
3. Гутников С.И., Лазорак Б.И., Селезнев А.Н. Стекланные волокна: Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы». – Москва, 2010. – 53 с.
4. Выбор видов волокон для дисперсного армирования изделий из центрифугированного бетона / Л.Р. Маилян, С.А. Стельмах, М.Г. Холодняк, Е.М. Щербань // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9, № 4.
5. СТО 13429727-001-2013. Конструкции фибробетонные с использованием полимерных волокон «ВСМ-Бетон» для объектов транспортного строительства. Технические условия. – Москва, 2013.