

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Мосты и тоннели»

Г. Д. Ляхевич
В. А. Гречухин
С. Ю. Рожанцев

БЕТОН ДЛЯ МОСТОВЫХ И ТОННЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, АРМИРОВАННЫЙ ОРГАНИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ

Пособие

для студентов специальности 1-70 03 02
«Мосты, транспортные тоннели и метрополитены»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2022

УДК 691(076.5)
ББК 38.3я7
Л98

Рецензенты:
Н. П. Матвейко, О. М. Вайтович

Л98 **Ляхевич, Г. Д.**
Бетон для мостовых и тоннельных конструкций, армированных органическими волокнами : пособие для студентов специальности 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин, С. Ю. Рожанцев. – Минск : БНТУ, 2022. – 102 с.
ISBN 978-985-583-253-0.

Авторами представлена характеристика органических армирующих волокон, рассмотрены преимущества их использования в бетоне, зависимости прочности бетона от количества и размера используемых полипропиленовых волокон. Представлены исследования влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на его предел прочности на растяжение при изгибе.

Изготовлены и испытаны опытные образцы безнапорных труб, армированных полипропиленовыми волокнами.

УДК 691(076.5)
ББК 38.3я7

ISBN 978-985-583-253-0

© Ляхевич Г. Д., Гречухин В. А.,
Рожанцев С. Ю., 2022
© Белорусский национальный
технический университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Термины, определения, обозначения	6
Глава 1. Органические армирующие волокна	14
1.1. Классификация органических армирующих волокон.....	14
1.2. Использование органических волокон в бетоне.....	15
1.3. Преимущества использования армирующих добавок в бетоне	20
Глава 2. Полипропиленовые волокна	23
2.1. Технические характеристики полипропиленовых волокон	23
2.2. Способы применения полипропиленовых волокон	24
2.3. Влияние полипропиленовых волокон на свойства бетона.....	25
2.4. Области применения полипропиленовых волокон	27
2.5. Фибра конструкционная	28
Выводы по главам 1, 2	31
Глава 3. Бетоны. Классификация и общие технические требования.....	32
3.1. Классификация бетонов.....	32
3.2. Требования к материалам	36
3.3. Составы и испытания высокопрочных бетонов	43
Выводы по главе 3	44
Глава 4. Экспериментальная часть	45
4.1. Материалы и технология изготовления образцов	45
4.2. Исследования влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на его предел прочности при сжатии.....	46
4.3. Влияние размера полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на его предел прочности при сжатии	49
4.4. Исследование влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на предел прочности на растяжение при изгибе.....	54
4.5. Волокна для бетона и смеси из них	54
4.6. Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона	57

4.7. Расчет элементов фибробетонных конструкций транспортных тоннелей (ФБТК)	63
4.8. Показатели качества ФБ и их применение при проектировании	66
4.9. Композиционная стержневая арматура	73
4.10. Общие правила проектирования монолитных, сборных и набрызгбетонных конструкций из фибробетона. Конструктивные требования	74
4.11. Рабочие и деформационные швы	75
4.12. Хрупкое разрушение бетона при огневом воздействии	79
4.13. Требования огнестойкости	80
4.14. Приготовление ФБ смесей для монолитных, сборных и набрызгбетонных («мокрого» способа нанесения) конструкций	83
4.15. Транспортирование ФБ смеси	85
4.16. Укладка и уплотнение ФБ смеси	87
Выводы по главе 4	89
Заключение	90
Список использованной литературы	91
Нормативные документы	95

ВВЕДЕНИЕ

Бетон характеризуется архитектурно-строительной пластичностью, простотой и доступностью технологии, возможностью использования местного сырья и утилизации техногенных отходов, хорошими технико-экономическими показателями, экологической безопасностью и является самым распространенным строительным материалом. Несмотря на огромное количество составов бетона, процесс создания новых его видов продолжается.

Дисперсное армирование – один из вариантов улучшения свойств бетона. В настоящее время накоплен достаточный опыт по применению дисперсно-армированных бетонов, и с учетом развития современных технологий, производство качественного высокопрочного бетона не представляет принципиальных трудностей. Тем не менее, растущие требования по нагрузкам и интенсивности их приложения постоянно диктуют повышение качества и поиск новых материалов.

В 1963 году было установлено, что полипропилен значительно повышает сопротивление удару и устойчивость бетона к раскалыванию, и полипропиленовые волокна (ППВ) использовали в защитных оболочках свай.

В бетонную смесь для плит покрытий полипропилен начали массово вводить в 80-е годы. В США в 10 % товарного бетона вводят ППВ, в Великобритании ППВ содержат миллионы кубометров бетона. В настоящее время такой бетон применяют для строительства большепролетных мостов, высотных зданий, специальных и других сооружений. Разрабатывается антибактериальный бетон, бетон для покрытий, бетон с обнаженным заполнителем, с пониженным взрывным откалыванием при воздействии огня.

В мостовых и тоннельных конструкциях добавки в виде полипропиленовых волокон (фибр) улучшают несущую способность бетона, повышают устойчивость бетона к истиранию, уменьшают трещинообразование, что, в свою очередь, приводит к снижению водопроницаемости. С улучшением вышеперечисленных показателей в конструкции попадает меньше щелочи и других вредных веществ, в результате увеличивается долговечность сооружений. Применение полипропиленовых волокон в качестве армирующей добавки для строительства в Беларуси является перспективной сферой и требует детального рассмотрения.

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ

Арматура фибровая (фибра) – короткие волокна из неорганических или органических материалов промышленного изготовления (по ТУ или EN) с формой и поверхностью, обеспечивающей сцепление с бетоном; предназначены для полной или частичной замены стержневой арматуры в конструкциях, а также для повышения трещиностойкости, ударной вязкости, износостойкости, сопротивления хрупкому разрушению бетона при огневом (пожарном) воздействии и циклических нагрузках.

Базальтофибробетон – бетон, армированный базальтовыми волокнами – фибровой арматурой (фиброй).

Базальтофибробетон с комбинированным армированием – базальтофибробетон в сочетании со стержневой, проволочной стальной арматурой (или стержневой стеклопластиковой арматурой при соответствующем обосновании).

Величина $CMOD$ – величина перемещения внешних граней надреза, выполненного по центру испытываемого образца-балки, при ее прогибе от действующей нагрузки.

Вид фибровой арматуры – материал, из которого изготовлена фибра.

Временная крепь – конструкция, устраиваемая для закрепления тоннельной выработки на период производства работ.

Гибридный фибробетон – фибробетон на основе двух или нескольких видов и (или) типов фибры, как по материалу, так и по размеру и форме.

Депланация поперечного сечения – перемещение точек поперечного сечения тонкостенного стержня, преобразующее его в кривую поверхность.

Класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_f – количественный и качественный показатель фибробетона.

Конструкционная фибра – фибровая арматура диаметром более 0,3 мм и длиной более 22 мм для стальной фибры и более 24 мм – для полимерной фибры, имеющая предел прочности на растяжение не менее 800 МПа для стальной и не менее 500 МПа для полимерной и др. волокон, используемая для армирования конструкции вместо стержневой арматуры либо используемая в сочетании со стержневой арматурой.

Коэффициент фибрового армирования – относительное содержание объема фибр в единице объема фибробетона.

Микрофибра – короткие волокна длиной 2–24 мм, диаметром менее 0,30 мм, изготавливаемые, как правило, из полипропилена и базальта и рассматриваемые в данном пособии в качестве специальной добавки в бетонах. Предназначены для:

- увеличения тиксотропности цементных составов, т. е. для нанесения более толстых слоев на вертикальные поверхности;
- уменьшения расслоения и водоотделения бетонных и растворных смесей;
- снижения трещинообразования на ранних стадиях твердения бетона от пластичной усадки;
- улучшения технологичности изготовления бетонных изделий;
- повышения ранней прочности после схватывания бетона;
- повышения устойчивости к истиранию;
- повышения огнестойкости.

Обделка – конструкция, предназначенная для закрепления на весь период эксплуатации внутренней поверхности горной выработки и придания ей правильного, соответствующего проекту очертания.

Остаточная прочность (сопротивление) фибробетона на растяжение при изгибе после образования трещины – нормируемый показатель, получаемый при испытаниях образцов-балок (призм) с надрезом, характеризующий способность ФБ воспринимать растягивающие напряжения в сечениях с трещинами за счет включения в работу конструкционной фибры.

Относительная длина фибры – отношение длины фибры к ее диаметру; определяет равномерность распределения фибры в бетонной смеси и характер ее работы в бетоне.

Полимерфибробетон (ПФБ) – фибробетон на основе полимерной конструкционной фибры.

Полимерфиброжелезобетон (ПФЖБ) – фибробетон на основе полимерной конструкционной фибры, армированный стержневой арматурой.

Предел пропорциональности (ЛОП) – область условно упругой работы фибробетона (бетона) до образования трещины.

Приведенный диаметр фибры – геометрический параметр фибры, характеризующий размеры ее поперечного сечения и соответствующий:

- диаметру фибры при круглом поперечном сечении фибры;

– диаметру окружности с площадью эквивалентной площади поперечного сечения фибры (указывается в технических условиях и спецификациях) – для фибр всех типов.

Прочность (сопротивление) на растяжение при изгибе бетона или ФБ $R_{bt, j}$ или $R_{fbt, j}$ – характеристика материала, определяемая максимальной нагрузкой в момент образования первой трещины при испытаниях образца-балки на растяжение при изгибе в диапазоне прогибов 0–0,1 мм (величина $CMOD$ 0–0,05 мм).

Содержание фибры – характеристика состава фибробетона, равная:

– для затвердевшего бетона – количеству фибры, назначаемому по массе [$кг/м^3$] или по объему [$м^3/м^3$ или %];

– для фибронабрызгбетона – разнице между количеством введенной фибры и количеством фибры в отскоке.

Сталефибробетон (СФБ) – фибробетон на основе стальной конструкционной фибры.

Сталефибробетон с комбинированным армированием, или сталефиброжелезобетон (СФЖБ) – сталефибробетон, армированный стержневой арматурой.

Стеклофибробетон (СтФБ) – фибробетон из мелкозернистого бетона на основе стекловолокна для тонкостенных элементов и конструкций, для которых важно снижение собственного веса, обеспечение водонепроницаемости бетона, сопротивления истиранию, наличие радиопрозрачности, а также повышение архитектурной выразительности и экологической чистоты.

Стеклофибробетон с комбинированным армированием (СтФЖБ) – стеклофибробетон в сочетании со стержневой, проволочной стальной арматурой (или стержневой стеклопластиковой арматурой при соответствующем обосновании).

Тип фибры – совокупность отличительных признаков фибры, таких как: форма поперечного сечения (круглая, прямоугольная, серповидная и т. д.); профиль (прямая фибра, волнистая фибра и т. д.); механизм анкеровки в бетоне (отгибы на концах, трение по боковой поверхности, волнистый профиль и т. д.) и других, характеризующих ее работу в бетоне и влияющих на свойства фибробетона.

Транспортный тоннель (автодорожный, перегонный тоннель метрополитена, железнодорожный либо совмещенный для нескольких видов транспортных средств и пешеходов) – подземное (или подводное) инженерное сооружение, предназначенное для пропуска

(проезда) транспортных средств через высотные или контурные препятствия, в том числе и в городах.

Трещина – полость, образованная без удаления материала двумя соединенными внутри тела поверхностями, которые при отсутствии в нем напряжений удалены друг от друга на расстояние, во много раз меньше протяженности самой полости.

Трещина магистральная – трещина, протяженность которой превосходит размеры структурных составляющих материалов и областей самоуравновешенных напряжений, и по поверхностям которой произойдет деление образца на части.

Трещиностойкость (вязкость разрушения) бетона – способность бетона сопротивляться началу движения и развитию трещин при механических и других воздействиях.

Фибробетон (ФБ) – бетон, армированный конструкционной фиброй, равномерно распределенной в его объеме.

Фибробетон с комбинированным армированием или фиброжелезобетон (ФЖБ) – фибробетон, армированный стержневой арматурой (бетон, армированный конструкционной фиброй в сочетании с арматурными стержнями).

Фибробетонные тоннельные конструкции (ФБТК) – обобщающий термин, применимый к тоннельным конструкциям, изготовленным или возведенным из фибробетона без или со стержневым армированием (ФБ или ФЖБ).

Фибронабрызгбетон (ФНБ) – набрызгбетон, армированный конструкционной фиброй в сочетании или без сочетания со стержневой арматурой.

Виды и характеристики фибры

Фибру классифицируют по материалу (сталь, стекло, базальт, полипропилен), по способу изготовления (фрезерование слябов, экструдирование из расплава, резка тонколистовой стали, резка проволоки), по геометрическим параметрам (длина, диаметр, форма сечения).

- СФ 1 – стальная фибра, резанная из проволоки;
- СФ 2 – стальная фибра, фрезерованная из сляба;
- СФ 3 – стальная фибра, рубленая из листа;
- СФ 4 – стальная фибра, вытянутая из расплава;

ПФ – полимерная конструкционная фибра из полимеров или полимерных смесей, например, пропилена, полиолефина, полиэтилена и т. п., прямая или деформированная, склеенная или скрученная, с защитным покрытием или без покрытия;

БФ – базальтовая фибра (из горных пород базальтовой группы);

СтФ – стекловолоконная фибра (рубленая из щелочестойкого волокна).

УФ – углеволоконная фибра;

МФП – микрофибра полимерная (микросинтетическая);

МФБ – микрофибра базальтовая;

l_f – длина фибры [мм];

d_f – приведенный диаметр фибры [мм];

l/d_f – относительная длина фибры;

N_f – количество фибр в ед. массы фибры [шт/кг];

R_f – расчетное сопротивление фибры растяжению [МПа, Н/мм];

E_f – модуль упругости фибры [МПа, Н/мм].

Фибробетоны по характеру работы на растяжение после образования трещин:

– упрочняющиеся – фибробетоны, при испытании которых на осевое растяжение с использованием стандартных образцов (по ГОСТ 10180), график «нагрузка – деформация» имеет восходящий тренд до и после образования трещин;

– разупрочняющиеся – фибробетоны, при испытании которых на осевое растяжение с использованием стандартных образцов (по ГОСТ 10180) график «нагрузка/деформация» имеет восходящий тренд до образования трещин и нисходящий тренд после образования трещин.

Частные коэффициенты надежности – коэффициенты надежности по нагрузке γ^f , коэффициенты надежности по материалу γ^m , коэффициенты условий работы γ^d и коэффициенты надежности по ответственности сооружений γ^n – коэффициенты, за счет использования которых учитываются возможные неблагоприятные отклонения расчетной схемы строительного объекта от реальных условий его эксплуатации, а также необходимость повышения надежности для отдельных видов строительных объектов.

Типы (виды) бетонов

1. По свойствам:

Напрягающий – бетон, содержащий расширяющийся цемент или расширяющую добавку, обеспечивающие расширение бетона в процессе его твердения.

Быстротвердеющий – бетон, быстро набирающий прочность.

Высокофункциональный – бетон, соответствующий специальным требованиям к функциональности, которые не могут быть достигнуты путем использования традиционных компонентов, методов смешивания, укладки, ухода и твердения.

Декоративный – бетон, получаемый путем окрашивания, полировки, текстурирования, тиснения, гравировки, использования топ-пингов и другими приемами для достижения требуемых эстетических свойств.

Дренирующий – бетон, содержащий крупный заполнитель при отсутствии или минимальном содержании мелкого заполнителя, а также недостаточное для заполнения пор и пустот количество цементного теста.

Жаростойкий – бетон, предназначенный для работы в условиях воздействия температур 800–1800 °С.

2. По составу:

Арболит – бетон, в котором в качестве заполнителя используют органические материалы растительного происхождения.

Армоцемент – мелкозернистый бетон, в массе которого равномерно распределены сварные проволочные металлические или тканые неметаллические сетки, он может дополнительно армироваться стержневой или проволочной арматурой.

Бетонополимер – бетон, пропитанный мономерами или жидкими олигомерами с последующей их полимеризацией (отверждением) в порах бетона.

Золобетон – легкий бетон, заполнителем в котором является зола.

Особо тяжелый – бетон средней плотности в сухом состоянии более 2500 кг/м³, в состав которого входят специальные заполнители.

Тяжелый – бетон на цементном вяжущем с плотными мелким и крупным заполнителями.

Мелкозернистый – бетон на цементном вяжущем с плотным мелким заполнителем.

Полимербетон – бетон, изготовленный из бетонной смеси, содержащей полимер или мономер.

Реакционный порошок – бетон, изготовленный из тонкоизмельченных реакционно-способных материалов с размером зерна 0,2–300 мкм, характеризующийся прочностью (более 120 МПа) и высокой водонепроницаемостью.

Силикатобетон – бетон, в котором в качестве вяжущего применяют известь.

Рециклированный – бетон, изготовленный с применением утилизированных вяжущих, заполнителей и воды.

3. По технологии изготовления:

Автоклавный – бетон заводского изготовления, твердеющий при давлении выше атмосферного.

Подводной укладки – бетон, укладываемый под воду трубопроводным транспортом или другими средствами.

Роликового формования – жесткий бетон, уплотняемый способом роликового формования.

Вакуумированный – бетон, из которого до затвердевания часть воды и вовлеченного воздуха удаляют вакуумированием.

Особо жесткий – бетон, полученный из бетонной смеси с неизмеряемой осадкой конуса и жесткостью.

Литой – бетон, полученный из бетонной смеси с осадкой конуса более 20 см.

Самоуплотняющийся – бетон, изготовленный из бетонной смеси, способной уплотняться под действием собственного веса.

Торкрет-бетон – мелкозернистый бетон, пневматически наносимый на поверхность.

Укатанный – особо жесткий бетон, уплотняемый виброукаткой или трамбованием.

По структуре:

4. Плотный – бетон, у которого пространство между зернами крупного и мелкого заполнителей или только мелкого заполнителя заполнено затвердевшим вяжущим и порами вовлеченного воздуха, образующихся в том числе за счет применения добавок, регулирующих пористость бетонной смеси и бетона.

Поризованный – бетон, у которого пространство между зернами крупного заполнителя заполнено затвердевшим поризованным вяжущим.

Ячеистый (газобетон и пенобетон) – бетон, состоящий из затвердевшей смеси вяжущего, кремнеземистого компонента и искусственных, равномерно распределенных пор в виде ячеек, образованных газо- и пенообразователями.

Крупнопористый – бетон, у которого пространство между зернами крупного заполнителя не полностью заполнено мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим.

Характеристики, применяемые при испытании образцов – балок (призм), (по методике EN 14651):

$CMODF_L$ – $CMOD$ при LOP , [мм];

$CMOD_j$ – значение $CMOD$, $j = 1, 2, 3$ или 4 , [мм];

F – нагрузка, [Н, кН];

F_j – значение нагрузки $j = 1, 2, 3$ или 4 , [Н, кН];

F_L – нагрузка при LOP , [Н, кН];

L – длина испытываемого образца, [мм];

M – изгибающий момент, [Н·мм, кН·м];

M_j – изгибающий момент $j = 1, 2, 3$ или 4 , [Н·мм, кН·м];

M_L – изгибающий момент, соответствующий нагрузке при LOP , [Н·мм, кН·м];

B – ширина испытываемого образца, [мм];

$R_{fb, m}$ – среднее внутрисерийное значение прочности на растяжение при изгибе в зоне LOP , [Н/мм, МПа];

$R_{F0.5, m}$ – среднее внутрисерийное значение остаточной прочности при $CMOD = 0,5$ мм, [Н/мм, МПа];

$R_{F2.5, m}$ – среднее внутрисерийное значение остаточной прочности при $CMOD = 2,5$ мм, [Н/мм², МПа];

$R_{F, j}$ – остаточная прочность на растяжение при изгибе $j = 1, 2, 3$ или 4 , [Н/мм², МПа];

h_{sp} – расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца, [мм];

L – длина пролета, [мм];

X – ширина (величина) надреза, [мм];

Y – расстояние от оси датчика перемещений до нижней грани испытываемого образца, [мм];

δ – прогиб, [мм];

δ_{FL} – прогиб при LOP , [мм];

δ_j – прогиб при фиксированном перемещении граней надреза $j = 1, 2, 3$ или 4 , [мм].

ГЛАВА 1. ОРГАНИЧЕСКИЕ АРМИРУЮЩИЕ ВОЛОКНА

1.1. Классификация органических армирующих волокон

Органические армирующие волокна, применяемые в строительстве, делят на природные и искусственные (рис. 1.1). Природные делят на волокна животного и растительного происхождения, а искусственные – на полимерные и углеродные.



Рис. 1.1. Классификация армирующих добавок

В настоящее время в строительстве для дисперсного армирования и улучшения строительно-технических и эксплуатационных свойств строительных конструкций применяют различные природные и искусственные армирующие волокна, вводимые в составы бетонов и строительных растворов.

Природные органические волокна включают:

а) подгруппу растительного происхождения – молекулы целлюлозы:

– высокомолекулярная целлюлоза, находящаяся в оболочке семян (хлопок);

– стебли растений (лен);

– листья растений (банан, оболочка плодов);

б) подгруппу животного происхождения:

– молекулы белка кератина (животная шерсть, конский волос);

– молекулы белка фиброина (натуральные волокна шелка из тутового или дубового шелкопряда).

Растительные волокна: пальмовые листья, джут, пеньку, кенаф, солому и др. – в строительстве применяют с древних времен, их относят к природным органическим. При армировании композиционных материалов нашли применение полипропиленовые, акрилонитрильные, полиолефиновые, полиэстеровые, полиамидные, полиэтиленовые и др. полимерные волокна.

Полипропиленовые, акрилонитрильные, целлюлозные волокна обеспечивают трехмерное армирование сухих смесей, а органические волокна длиной 20–7500 мкм компенсируют влияние недостатков фракционного состава, снижают усадку, улучшают типотропные свойства и фиксирующую способность, увеличивают трещиностойкость, деформационную способность полимерцементного камня, морозостойкость и ударную вязкость сухих строительных смесей. Для обеспечения равномерного перемешивания волокон любой длины применяют двухстадийное смешение [1].

1.2. Использование органических волокон в бетоне

Первые армирующие волокна (овечья шерсть) обнаружили в блоках египетских пирамид. Для возведения древних жилищ (землянок, хижин) из грунта использовали волокна растений. Затем появилась металлическая фибра, а с появлением полимеров, появилась полипропиленовая фибра. Армирующие волокна повышают физико-механические, деформативные и эксплуатационные свойства строительных конструкций.

Фибру классифицируют по материалу, способу изготовления и геометрическим параметрам. Нашли применение полимерные во-

локна: полипропиленовые, полиолефиновые, полиэстеровые, полиамидные, полиэтиленовые и др.

Органические волокна, введенные в количестве 0,6–2,7 кг/м³ снижают усадку и образование трещин, повышают сопротивление удару, устойчивость к истиранию, морозостойкость и долговечность бетона [2].

Т. Экобори [3] отмечает прочность бетонных композитов при применении армирующих фибр, которые снижают образование внутренних микротрещин и уплотняют структуру, улучшая защиту стальной арматуры и повышая долговечность бетона.

Полипропиленовые волокна вводят в смесительную установку на бетонном заводе. Их количество составляет 0,1 % по объему или 0,6–0,9 кг/м³ бетона (один мешок) и смешивают в течение 5 минут. Дозировку волокон повышают при приготовлении прочных и устойчивых к раскалыванию бетонов [4].

В статье «Бетон, армированный нановолокнами» [5] выдвинута теория об использовании активных армирующих наполнителей для улучшения свойств композиционного бетона. Наполнители поглощают ионизирующие излучения, понижают текучесть и объемную усадку, улучшают формуемость и формоустойчивость. Целью исследований была разработка композиционных бетонов для биологической защиты ядерных реакторов с различными видами фибр, как органических, так и неорганических.

Полипропиленовые волокна (ППВ) [6] готовят из полимеров или сополимеров пропилена (олефиновые волокна). Полипропилен инертен, стоек к кислотам, щелочам и солям. Связь с матрицей цемента улучшает специальная добавка. Полипропиленовые волокна безопасны, химически нейтральны и совместимы со всеми вяжущими веществами и добавками.

В 1984 и 1991 годах Херц [7, 8] изучал воздействие огня на бетон. В двух сериях испытаний изменялись показатели температуры, размеры цилиндрических образцов и процент содержания стальных волокон для уменьшения риска взрыва. В первой серии испытали 15 цилиндрических образцов с размерами 10×20 см с содержанием микрокремнезема 14–20 % по методам испытаний остаточного сопротивления.

Дидерихс и другие [9] в 1988 году в ходе испытаний изучили воздействие огня на высокопрочный бетон. Они испытали четыре вида бетона.

Кастильо и Дурани [10] в 1990 году изучали воздействие временных увеличений температуры на прочность высокопрочного бетона. В исследовании испытывали обычный и высокопрочный бетон.

Фелисетти и другие [11] в 1996 году в ходе испытаний высокопрочного бетона изучили его характеристики под воздействием огня. В испытании они использовали метод остаточного сопротивления для изучения характеристики бетона. Нагрузки происходили с контролем деформаций. Образцы были приготовлены с прочностью 72 МПа и 95 МПа.

Фан и Карино [12] в 2002 году в ходе лабораторной программы в Обществе стандартов и технологий США (NIST) изучили воздействие высокой температуры на механические характеристики и возможность появления взрывного откалывания в высокопрочном бетоне. В данном испытании исследовались механические характеристики цилиндрических образцов с высокой прочностью в условиях увеличения температуры до 600 °С.

Хан и другие [13] в 2004 году начали изучать явление взрывного откалывания в бетонах с полипропиленовыми волокнами. Они использовали подбор состава бетонной смеси, вводя 0,5–10 % волокна по объему. С увеличением количества полипропиленовых волокон в бетоне количество откалываний уменьшилось.

Бенуд и Зиари [14] в 2008 году изучили остаточное сопротивление высокопрочного бетона при увеличении температуры.

Сахмаран и другие [15] в 2010 году изучили механические характеристики и микроструктуру поврежденного от воздействия температуры высокопрочного бетона.

Рабинович [16] в 1980-х годах начал изучать дисперсно-армированные бетоны. Он провел ряд испытаний относительно введения в бетон-матрицу армирующих добавок.

Рамчандран, Фельдман и другие [17] в 1985 г. проводили испытания различных армирующих добавок в бетоны и изучали их физико-химические свойства.

Козина [18] в 1978 году изучала вопросы повышения ударопрочности и трещиностойкости конструкций путем введения в бетон низкомолекулярных полимерных волокон.

Козлов, Каган и другие [19] в начале 80-х годов рассматривали цементные композиции с низкомолекулярными волокнами в качестве гидроизоляционных материалов в сфере тоннелестроения и подземных сооружений.

Купер, Пигготт и другие [20] проводили исследования по растрескиванию и разрушению композитов в 1979 году.

Козлов и другие [21] в 1983 году изучали вопросы применения композитных материалов для зачеканки швов отделки тоннелей.

Рабинович [22] рассмотрел проблемы теории, методов расчета и проектирования, а также создания технологий производства и применения эффективных строительных конструкций на основе бетона, дисперсно-армированного различными высокопрочными волокнами, в том числе и полипропиленовыми. Такие конструкции высокоэффективны в сложных статистических неопределимых системах со значительными градиентами внутренних усилий и знакопеременными напряжениями.

Полипропиленовое фиброволокно улучшает сцепление и снижает отскок торкретбетона [23]. При увеличении дозировки длинных волокон фибры его прочность равноценна прочности бетона, содержащего 25–30 кг стальной арматуры. Бетон с полипропиленовыми волокнами менее подвержен повреждениям при распалубке и транспортировке, он имеет пониженную проницаемость и более стоек к коррозии. Полипропиленовые волокна повышают сцепление бетонной смеси, что ускоряет темпы строительства при использовании скользящей опалубки и снижает объемы ремонтных работ.

Грибов в своей статье «Моделирование поведения фибробетонных конструкций в условиях радиационного облучения» [24] пишет о проблеме моделирования поведения армированных бетонных конструкций с учетом воздействия радиационных сред, так как прогнозирование прочности и долговечности конструкций, длительное время находящихся в радиационной среде, имеет первостепенное значение для нормальной безаварийной эксплуатации ответственных сооружений. В данной работе он рассматривает модель деформирования прямоугольной дисперсно-армированной пластины при воздействии радиационных сред.

Бетон передает нагрузку волокнам посредством касательных сил, действующих по поверхности раздела [25]. Полипропиленовые волокна предотвращают появление пластических усадочных трещин. Наибольшее применение волокна нашли в бетонных плитах покрытий, упрощая укладку бетонной смеси [26].

Полипропиленовые добавки в бетонные смеси нашли применение и в Республике Беларусь, чему посвящена статья «Эффективность применения волокнистых добавок в бетон» [27].

При пожаре в туннеле под Ла-Маншем нагревание высокопрочного бетона до температуры выше 200 °С сопровождалось взрывным откалыванием. Введение полипропилена, плавящегося при температуре 160–170 °С, создает капилляры для выхода пара на поверхность. В настоящее время ППВ применяют для туннелей, где взрывное откалывание угрожает жизни людей [28].

Для армирования бетона используют различные типы фибры, что говорит о сложности ее выбора для выполнения определенной задачи. Одной из проблем использования волокна сегодня является не только недостаток информации, но и неправильное использование фибры.

В СТБ EN 14889 «Фибры для бетона» рассматривается применение фибробетона, который должен отвечать требованиям ГОСТ 26633 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые» и ГОСТ 25192 «Бетоны. Классификация. Общие технические требования».

Чтобы правильно определить необходимый тип волокна, нужно конкретно сформулировать задачу. Если говорить о международных нормах, то существуют основные стандарты [29, 30, 31] для армированного бетона.

Международный стандарт ASTM C 116-03 [30], описывающий армирование бетонов и торкретирование фиброй, определяет три общих класса армированного бетона:

- армированный стальными волокнами бетон или торкретбетон;
- армированный стекловолокном бетон или торкретбетон;
- армированный полимерными волокнами бетон или торкретбетон.

По стандарту СТБ EN 14889 полимерные волокна определены как «полиолефины, например, полипропилен или полиэтилен, полиэстер, нейлон, ПВА, полиакрил, арамиды и смеси из них». Полимерные волокна разделены на два класса в зависимости от их физической формы:

а) класс I. Микроволокна:

- класс I a. Микроволокна <0,3 мм в диаметре, монофиламентные;
- класс I b. Микроволокна <0,3 мм в диаметре, фибриллированные;
- б) класс II. Макроволокна >0,3 мм в диаметре.

«Класс I. Микроволокна» – увеличивают сопротивление ударной нагрузке, огнестойкость и пожаробезопасность, уменьшают пластическую усадку.

«Класс II. Структурные макроволокна» – заменяют металлическую сетку, уменьшают трещинообразование или служат структур-

ной арматурой. Согласно стандарту EN 14889, макроволокна используют для увеличения прочности при растяжении и изгибе. Короткие волокна уменьшают количество микротрещин, длинные снижают число дискретных микротрещин при высоких нагрузках.

Однородность распределения волокон в материале повышает его эксплуатационную надежность. Бетон лучше воспринимает воздействующую нагрузку. Комбинированное применение волокон разной длины предотвращает развитие процессов трещинообразования, вызванных растягивающими и изгибающими нагрузками.

Дисперсное армирование повышает долговечность бетона при пониженных температурах и агрессивном воздействии водных растворов. На стадии структурообразования перераспределяются напряжения при усадке на весь объем материала, а в процессе эксплуатации замедляется рост трещин, снижается концентрация напряжений в области макродефектов, выравниваются и перераспределяются напряжения в структуре бетона между его составляющими.

Органические волокна могут улучшить свойства бетонной смеси, обеспечить вторичное армирование и в особенности контроль усадки.

Таким образом, применение дисперсного армирования снижает концентрацию напряжений, предотвращает развитие встречных трещин и затрудняет процесс трещинообразования. Варьируя типы волокон и соотношение объема волокон, можно направленно регулировать свойства бетона.

1.3. Преимущества использования армирующих добавок в бетоне

Дисперсное армирование повышает прочность, трещиностойкость, сопротивление ударным и динамическим нагрузкам, абразивный износ, сохраняя при этом целостность конструкции даже после появления сквозных трещин, предотвращает отслаивание поверхности и т. д. Высокодисперсные волокнистые наполнители улучшают структурообразование, в результате совмещения микроармирующего волокна и матрицы цементного камня существенно повышаются деформативные свойства материала. Микроармирующие волокна позволяют получать тонкослойные элементы с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами.

Армирующие волокна улучшают физико-механические, деформативные и эксплуатационные свойства строительных конструкций. Армирующие добавки увеличивают предел прочности при растяжении и срезе, ударную и усталостную прочность, снижают усадочные деформации, предотвращают трещинообразование, увеличивают эластичность, сопротивление удару и истиранию, повышают морозостойкость, водонепроницаемость.

Волокна изменяют концентрацию мелких пор цементной системы, уменьшая расстояния между ними, сокращая размеры и количество капиллярных пор. Они значительно повышают плотность цементного камня, водонепроницаемость, морозостойкость и прочность бетона на сжатие и на растяжение при изгибе. Волокна, распределенные по всему объему бетонной смеси, препятствуют ее расслоению, способствуют получению плотной гомогенной структуры цементного камня, обеспечивают более полную гидратацию цемента и снижают истираемость бетона.

Обладая высокой адгезионной способностью, волокна обеспечивают значительный армирующий эффект, повышая тем самым прочность цементной матрицы как наиболее уязвимой составляющей бетона. Волокна, рассредоточенные в бетоне и образующие своеобразную 3D-матрицу, позволяют эффективно препятствовать развитию процессов, приводящих к пластической (первичной) усадке. Благодаря полному заполнению по всему объему, волокна исключительно работают для предотвращения первичного трещинообразования.

За счет своих свойств синтетические волокна, равномерно распределенные в бетонной смеси, прямым образом влияют на одно из важнейших ее технологических свойств – однородность, препятствуя оседанию частиц зерновой фракции смеси при динамическом воздействии на нее. Волокно, воздействуя на процессы структурообразования, способствует снижению внутренних напряжений, уменьшению количества очагов возникновения внутренних дефектов бетона, и их размеров, предотвращая тем самым их дальнейшее развитие. Этот факт оказывает существенное влияние на увеличение ударной (динамической) прочности бетона.

Микроволокна используют для уменьшения склонности бетона к взрыву во время пожаров, так как полипропиленовые волокна тают, освобождая поры и капилляры для выхода водяного пара из бе-

тона. Для этих целей Eurocode 2, часть 1–2 предлагает добавлять в высокопрочные бетоны 2 кг/м^3 полипропиленовых микроволокон.

Повысить трещиностойкость, коррозионную стойкость и атмосферостойкость бетона, а также обеспечить требуемые эксплуатационные параметры и долговечность можно, выбирая волокна и их соотношение. Армирующие волокна обеспечивают трехмерное упрочнение бетона, что уменьшает сечение и массу строительных конструкций. Синтетические волокна повышают долговечность, трещиностойкость и ударную вязкость бетона, понижают усадочную деформацию. Моноволокна и мультисловолокна позволяют избежать усадочных трещин в бетоне на ранней стадии, повышают ударопрочность и водопроницаемость бетона. Полипропиленовые волокна устойчивы к щелочам, их расход составляет $0,5\text{--}2 \text{ кг}$ на 1 м^3 бетона.

Армирование полимерными волокнами не является альтернативой стальному армированию, однако оно существенно снижает возможность пластического образования усадочных трещин и минимизирует эффекты от термического растрескивания.

Полипропиленовые волокна длиной от 20 до 7500 мкм , введенные в сухие смеси, обеспечивают трехмерное армирование раствора, компенсируя недостатки фракционного состава, снижает усадку, возникающую при затвердевании строительного раствора, улучшает типсotropные свойства и фиксирующую способность, увеличивает трещиностойкость, деформационную способность полимерцементного камня, морозостойкость и ударную вязкость.

ГЛАВА 2. ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫЕ ВОЛОКНА

Полипропиленовые волокна получают из полимеров или сополимеров пропилена. Расплавленный полипропилен после штамповки с вытяжкой, образует ровные листы или волокна, из которых получают два типа ППВ:

– фибриллированные волокна получают расщеплением ровных листов на мелкие волокнистые элементы, из которых состоит основная структура, затем их разрезают на части различной длины. В поперечном сечении волокна имеют форму, близкую к прямоугольной;

– моно- и мультифиламентные волокна круглого поперечного сечения также разрезают на части различной длины.

Полипропиленовые волокна являются инертным сырьем, стойким к кислотам, щелочам и солям, подходят и для цементных смесей. Специальная добавка улучшает связь с матрицей цемента. ППВ – чистое, безопасное, простое в использовании, химически нейтральное и совместимое со всеми вяжущими веществами и добавками волокно.

Наиболее распространены сегодня полипропиленовые волокна, предназначенные для использования в бетонных и растворных смесях следующих производителей: Fibrin, Krenit, Crackstop, Adfil (Англия), Belgianfibers (Бельгия), Preurofiber Baumhuter GmbH (Германия).

2.1. Технические характеристики полипропиленовых волокон

Полипропиленовые волокна используют в качестве армирующей добавки в бетонные и растворные смеси. ППВ улучшают свойства смеси, обеспечивают вторичное армирование и контролируют усадку. Целесообразным является добавление в бетон ППВ в количестве 0,6–2,7 кг/м³, так как благодаря такому количеству добавки снижается образование трещин при пластической усадке, повышается сопротивление удару, устойчивость к истиранию и морозостойкость, что обеспечивает повышенную долговечность бетона. Технические характеристики ППВ представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Техническая характеристика полипропиленовых волокон

Свойства	Показатель
Диаметр, мкм	12–35
Длина, мм	2–20
Материал полипропилен, %	100
Модуль упругости при изгибе, кН	65–117
Прочность на разрыв, МПа	350–550
Относительно удлинение при пределе текучести, %	10–20
Относительно удлинение при разрыве, %	200–800
Температура размягчения, °С	160–170
Цвет	прозрачно-белый
Расход, г на м ³ бетона	600–2000
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	24–39
Химическая устойчивость	полная ко всем кислотам, щелочам, растворителям
Предел текучести при растяжении, МПа	25–34
Плотность, г/см ³	0,90–0,91

2.2. Способы применения полипропиленовых волокон

ППВ обеспечивает устойчивость к выступанию воды, оседанию, растрескиванию при пластической усадке, истиранию, циклам замораживания/оттаивания, сопротивление удару, а также огнестойкость, остаточную прочность, антимикробную защиту и пониженную проницаемость. В случае, если волоски фибры выступают на поверхности, их можно либо подпалить огнем, либо оставить как «анкеровку» для лучшего сцепления с «финишным» отделочным слоем.

Применять волокна целесообразно на начальном этапе приготовления бетонной смеси. Бетон и растворы, армированные фиброй, подают насосом или торкретируют.

Дозировка определяется требованиями проекта и обычно составляет 0,6–0,9 кг/м³ бетона (один растворимый мешок массой 0,6–0,9 кг). Равномерное рассеивание без образования комков и скоплений достигается через пять минут смешивания в автобетономешалке.

Дозировка и длина фибры:

а) в бетонах:

- армированные: 2 кг/м³, длина волокон 12 мм;
- неармированные: 0,7–1,0 кг/м³, длина волокон 12 мм;
- ячеистые: 0,1 % от массы пенобетона, длина волокна 12 мм.

б) в штукатурке, в сухих смесях:

- конечная штукатурка: 900 г/м³, длина волокна 4 мм;
- сухие смеси: 900 г/м³, длина волокна 6 и 8 мм.

ППВ применяют по двум вариантам:

– полипропиленовую фибру в количестве 0,9 кг на 1 м³ бетона засыпают в бетоно- или растворосмеситель в сухую смесь перед добавлением воды и перемешивают со скоростью 90–110 оборотов в минуту в течение 4–5 минут для миксеров объемом 6–8 м³;

– полипропиленовую фибру предварительно затворяют в воде и после распределения волокон смесь добавляют в цементный раствор.

Пластичность бетона или раствора увеличивают добавлением пластификатора. Бетон и растворы, армированные фиброй, подают насосом и торкретируют.

2.3. Влияние полипропиленовых волокон на свойства бетона

Снижение микропластической усадки и трещинообразования в процессе твердения бетона:

– уменьшает количество и размер трещин, увеличивая способность бетона к деформации без разрушения в период 2–6 часов после укладки, и сохраняет внутреннюю прочность бетона;

– снижает возможность появления разлома и соединяет края трещин после затвердения бетона;

– уменьшает выделение воды, внутренние нагрузки и образование трещин благодаря эффективному контролю гидратации.

Волокна повышают морозостойкость бетона, и по долговечности он не уступает бетону с воздухововлекающими добавками.

Механизм повышения морозостойкости следующий:

– воздушные пузырьки, которые вносят в бетон волокна, позволяют свободной воде расширяться и сжиматься в цикле замерзание/оттаивание;

– полипропиленовая фибра повышает прочность бетона на сжатие и устойчивость к воздействию антиобледеняющих солей, благодаря контролю за перемещением воды в бетоне препятствует поднятию на поверхность песка и цемента;

– волокно повышает устойчивость к пластическому растрескиванию, уменьшает количество водных каналов и снижает проницаемость бетона, что повышает устойчивость к промерзанию;

– 375 млн волокон в 1 м^3 укрепляют бетон по всему его объему, включая поверхность и края, и связывают цементный раствор, повышая морозостойкость.

Добавление волокон повышает пластичность бетона, устойчивость и сопротивление удару по сравнению с обычным бетоном, тесты показывают 5-кратное превышение по данному фактору.

После образования трещин в цементном растворе волокна при натяжении поглощают большое количество энергии, обеспечивая защиту от разрушения краев соединений в бетонных плитах покрытий и сборных железобетонных конструкциях, увеличивая сопротивление удару. Благодаря данным свойствам волокна можно использовать в тяжелой промышленности, военных целях для повышения взрывоустойчивости и в местах повышенной сейсмической активности.

Содержание цемента и качество заполнителя повышают устойчивость бетона с полипропиленовой фиброй к истиранию. Через 6 часов она может повыситься примерно на 10 % и достигать 30 %. За счет контроля над перемещением воды в бетонной смеси уменьшается сегрегация мелких частиц цемента и песка, обеспечивая эффективную гидратацию цемента и лучшее сцепление цементного раствора, что дает прочную и долговечную поверхность.

Бетон с полипропиленовой фиброй более устойчив к изгибу после воздействия температуры $600 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 часа. Фибра повышает устойчивость бетона к раскалыванию после воздействия горения углеводорода (2 часа при $1100 \text{ }^\circ\text{C}$). Волокна снижают проницаемость и водопоглощение бетона за счет уменьшения в бетоне количества отверстий от выступившей воды.

Полипропилен повышает устойчивость бетона к проникновению антиобледеняющих солей, его используют в бетонных дорогах и мостах. Полипропилен инертен, поэтому добавки к бетону не ухудшают его рабочих характеристик. Он устойчив к щелочам и другим химическим веществам.

Введение полипропиленовых волокон в торкретбетон:

– не влияет на технологию выполнения работ. Добавление волокна в количестве $2,7 \text{ кг/м}^3$ уменьшает отскок на 22 %, процентное соотношение увеличивается при возрастающем содержании волокна;

– повышает прочность на изгиб. Полипропиленовые волокна не применяют как первичное (основное) армирование, однако они предупреждают полный внезапный отказ сборной бетонной конструкции;

– повышает однородность торкретбетона;

– уменьшает образование внутренних напряжений при пластической усадке (до 50 %);

– повышает износостойкость бетонной поверхности;

– повышает прочность бетона на изгиб, при сжатии и раскалывании (до 35 %);

– повышает ударную и усталостную прочность бетона (до 80 %).

Полипропиленовые волокна, введенные в штукатурные и ремонтные растворы, препятствуют появлению волосяных и усадочных трещин, повышают морозостойкость и водоудержание раствора.

2.4. Области применения полипропиленовых волокон

Полипропиленовые волокна предотвращают пластические усадочные трещины в мостах, тоннельных сооружениях и др. Их используют в бетонных плитах для замены вторичной стальной проволочной арматуры. Бетон с ППВ быстрее и экономичнее укладывать.

Использование ППВ в торкретбетонах улучшает сцепление бетонной смеси, снижает отскок и ускоряет укладку. При увеличении количества длинных фибриллированных волокон его прочность достигает прочности бетона, содержащего 25–30 кг стальной арматуры.

При использовании ППВ в сборном бетоне уменьшается опасность повреждения при распалубке и последующей транспортировке, понижается проницаемость и повышается устойчивость к коррозии.

При использовании скользящих опалубок бетон с ППВ имеет лучшее сцепление бетонной смеси, что повышает темпы строительства и снижает объемы ремонтных работ.

2.5. Фибра конструкционная

Классификация стальной фибры СФ по прочности приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Классы прочности стальной фибры СФ1

Класс	Форма фибры	Характеристика	Эквивалентный диаметр фибры, мм		
			$0,15 \leq df < 0,50$	$0,50 \leq df < 0,80$	$0,80 \leq df \leq 1,20$
R1	прямая	R_m	400	350	300
		$RP_{0,2}$	320	280	240
R2	деформированная	R_m	480	450	390
		$RP_{0,2}$	400	350	300
R3	прямая	R_m	800	800	700
		$RP_{0,2}$	720	640	560
R2	деформированная	R_m	1080	1040	910
		$RP_{0,2}$	900	800	700
R1	прямая	R_m	1700	1550	1400
		$RP_{0,2}$	1360	1240	1120
R2	деформированная	R_m	2040	2015	1820
		$RP_{0,2}$	1700	1550	1400

В несущих конструкциях тоннелей и подземных сооружений, в которых применяется только фибровое армирование при соответствующих расчетных обоснованиях, допускается только деформированная стальная фибра с отгибами на концах.

Процент фибрового армирования по объему μ_v (содержание фибры в 1 м^3 фибробетонной смеси) для обеспечения требуемого класса ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе (B_F) указывается в проектной документации на изделие, конструкцию или сооружение.

Качество фибры контролируют путем проверки ее геометрических параметров и временного сопротивления разрыву для стальной фибры, а для полимерной фибры – геометрических параметров, временного сопротивления разрыву и относительного удлинения при разрыве (EN14889-1 и EN14889-2).

Временное сопротивление разрыву определяют по ГОСТ 10446 испытанием на разрывной машине, обеспечивающей точность по ГОСТ Р ISO 5725-2 до 1 %.

При наличии сертификата соответствия на стальную фибру проверку ее качества не проводят.

Действие ГОСТ 10446 не распространяется на конструкции с предварительно напрягаемой арматурой.

Стержневая арматура применяется при комбинированном армировании фибробетонных конструкций.

Для армирования фибробетонных конструкций следует применять отвечающую требованиям соответствующих государственных стандартов или утвержденных в установленном порядке технических условий арматуру следующих видов:

- горячекатаную гладкую и периодического профиля (по ГОСТ 5781) с постоянной и переменной высотой выступов (соответственно кольцевой и серповидный профиль) диаметром 6–40 мм;
- термомеханически упрочненную периодического профиля (по ГОСТ 10884) с постоянной и переменной высотой выступов (соответственно кольцевой и серповидный профиль) диаметром 6–40 мм;
- холоднодеформированную периодического профиля (по ГОСТ 5781) диаметром 3–12 мм.

Основным показателем качества арматуры, устанавливаемым при проектировании, является класс арматуры по прочности на растяжение, принимаемый в соответствии с СНБ 5.03.01-02, который гармонизирован с европейскими нормативными документами EN 206-1 «Бетон. Часть 1. Технические условия, эксплуатационные характеристики, производство и критерии соответствия», ИСО 3898: 1997 «Основные положения проектирования конструкций. Условные обозначения. Основные символы», EN 1992-1 Еврокод 2: «Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1: Общие правила проектирования и правила проектирования зданий».

В настоящее время обозначение классов арматуры производится буквой «S» и числом, соответствующим нормативному сопротивлению в МПа (S240, S500, S1000).

Кроме того, в необходимых случаях к арматуре предъявляют требования по дополнительным показателям качества: свариваемость, пластичность, хладостойкость и др.

Для фибробетонных конструкций с комбинированным армированием, проектируемых в соответствии с требованиями настоящего нормативного документа, следует предусматривать арматуру гладкую и периодического профиля.

Фиброволокна значительно снижают образование внутренних микротрещин и способствуют структурному уплотнению, что является главным показателем улучшения защиты стальной арматуры и, как следствие, повышения долговечности бетона.

Обычная дозировка составляет 0,1 % по объему или 0,6–0,9 кг/м³ бетона. Для удобства в применении ППВ поставляется в растворимых мешках по 0,6–0,9 кг. На каждый кубометр бетона добавляется один мешок ППВ в смесительную установку на бетонном заводе или прямо в автобетономешалку. Достаточно всего 5 минут смешивания в автобетономешалке для равномерного распределения без образования комков и скоплений. Более высокая дозировка, особенно фибриллированных волокон, используется в сборном бетоне, торкрет-бетоне и других видах бетона, где важна прочность и устойчивость к раскалыванию.

В данном испытании исследовались механические характеристики цилиндрических образцов с высокой прочностью в условиях увеличения температуры до 600 °С.

Однородность распределения волокон в материале дополнительно повышает его эксплуатационную надежность. Бетон, в котором фибра распределена равномерно, наилучшим образом сопротивляется воздействующей нагрузке. В идеале фиброволокно должно находиться в каждой секции структурных элементов, образующих бетон. Таким образом, комбинированное применение волокон разной длины предотвращает развитие процессов трещинообразования, вызванных растягивающими и изгибающими нагрузками.

Данный вид дисперсного армирования обеспечивает бетону высокую долговечность в условиях пониженных температур и агрессивного воздействия водных растворов благодаря тому, что на стадии структурообразования происходит перераспределение напряжений при пластической усадке от наиболее опасных зон на весь объем материала, а в процессе эксплуатации – замедление темпов роста трещин, снижение концентрации напряжений в области макродефектов, выравнивание и перераспределение напряжений в структуре бетона между его составляющими.

Выводы по главам 1, 2

Армирующие волокна бывают природные и синтезированные, органические и минеральные. Их вводят для улучшения их строительно-технических и эксплуатационных свойств строительных материалов и конструкций.

Дисперсное армирование обеспечивает трехмерное упрочнение композитов, изменяет свойства цементного камня и других искусственных композитов, придавая им высокую трещиностойкость, сопротивление ударным и динамическим нагрузкам, необходимый запас прочности, целостность конструкции даже после появления сквозных трещин, повышая абразивный износ, предотвращая отслаивание поверхности.

ППВ в количестве 1 % по объему повышает прочность бетона на срез и удерживает крупный заполнитель у поверхности.

Полипропиленовые волокна улучшают свойства смеси, обеспечивают вторичное армирование, препятствуют образованию трещин.

ГЛАВА 3. БЕТОНЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3.1. Классификация бетонов

Бетоны классифицируются по следующим признакам:

- основное назначение;
- стойкость к видам коррозии;
- вид вяжущего;
- вид заполнителей;
- структура;
- условия твердения;
- прочность;
- скорость набора прочности;
- средняя плотность;
- морозостойкость;
- водонепроницаемость;
- истираемость.

В зависимости от основного назначения бетоны подразделяют на:

- конструкционные;
- специальные (например, теплоизоляционные, радиационно-стойкие, декоративные).

По стойкости к видам коррозии бетоны подразделяют на следующие виды:

А – эксплуатируемые в среде без риска коррозионного воздействия (ХО);

Б – эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием карбонизации (ХС);

В – эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием хлоридов (ХД и ХС);

Г – эксплуатируемые в среде, вызывающей коррозию под действием попеременного замораживания и оттаивания (ХФ);

Д – эксплуатируемые в среде, вызывающей химическую коррозию (ХА).

Примечание – среда эксплуатации бетона указана в соответствии с ГОСТ 31384.

По виду вяжущего бетоны подразделяют на:

- цементные;

- известковые;
- шлаковые;
- гипсовые;
- специальные (например, полимербетоны, бетоны на магнезиальном вяжущем).

По виду заполнителей выделяют бетоны на заполнителях:

- плотных;
- пористых;
- специальных (например, металлическая дробь, вспененный гранулированный полистирол).

По структуре выделяют бетоны со структурой:

- плотной;
- поризованной;
- ячеистой;
- крупнопористой.

По условиям твердения бетоны подразделяют на твердеющие:

- в естественных условиях;
- в условиях тепловой обработки при атмосферном давлении;
- в условиях тепловой обработки при давлении выше атмосферного (бетоны автоклавного твердения).

По прочности выделяют бетоны:

- средней прочности;
- высокопрочные (тяжелый бетон класса по прочности на сжатие С35/45 и выше).

По скорости набора прочности в нормальных условиях твердения бетоны подразделяют на:

- быстротвердеющие;
- медленнотвердеющие.

По средней плотности бетоны подразделяют на:

- особо легкие (марки по средней плотности менее D800);
- легкие (марки по средней плотности от D800 до D2000);
- тяжелые (марки по средней плотности более D2000 до D2500);
- особо тяжелые (марки по средней плотности более D2500).

По морозостойкости выделяют бетоны:

- низкой морозостойкости (марки по морозостойкости F50 и менее);
- средней морозостойкости (марки по морозостойкости от F50 до F300);

– высокой морозостойкости (марки по морозостойкости более F300).

По водонепроницаемости выделяют бетоны:

– низкой водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости менее W4);

– средней водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости от W4 до W12);

– высокой водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости более W12).

По истираемости выделяют бетоны:

– низкой истираемости (марка по истираемости G1);

– средней истираемости (марка по истираемости G2);

– высокой истираемости (марка по истираемости G3).

Наименование бетона определенного типа (вида) должно включать в себя, как правило, все классификационные признаки, установленные стандартом. Признаки, не являющиеся определяющими для бетона данного типа (вида), допускается не включать в его наименование. В наименовании конструкционного бетона слово «конструкционный» может быть опущено.

При необходимости в наименовании бетона могут указываться конкретные виды вяжущих, заполнителей, условия твердения, а также тип (вид) бетона, уточняющие его назначение, свойства, состав или технологию изготовления.

Для бетонов, характеризующихся наиболее часто применяемыми сочетаниями признаков, используют следующие наименования: тяжелый бетон, мелкозернистый бетон, легкий бетон, ячеистый бетон, силикатный бетон, жаростойкий бетон, химически стойкий бетон.

Требования к качеству бетонов должны устанавливаться в зависимости от их назначения и условий работы в конструкциях зданий и сооружений:

– в стандартах на бетоны определенного типа (вида);

– в стандартах и технических условиях на сборные бетонные и железобетонные изделия;

– в рабочих чертежах монолитных бетонных и железобетонных конструкций.

В нормативных или технических документах на бетоны конкретных типов (видов) должны быть приведены параметрические ряды значений нормируемых показателей качества бетона, контро-

лируемых при производстве конструкций (классы прочности; марки по морозостойкости, водонепроницаемости, средней плотности и другие).

Каждый нормируемый показатель качества должен иметь стандартизованную методику его определения, а при ее отсутствии – утвержденную методику, которая должна быть приведена в нормативном или техническом документе, устанавливающем требование к данному показателю качества.

Требования к материалам для приготовления бетонных смесей (к вяжущим, добавкам, заполнителям, затворителям) и к составу бетона должны устанавливаться в нормативных или технических документах, а также в технологической документации на бетон конкретного вида.

Требования к нормируемым технологическим показателям бетонных смесей и технологии производства работ по изготовлению бетонных и железобетонных конструкций должны содержаться в технологической документации (проект производства работ, технологический регламент или технологическая карта) на изготовление конструкций конкретных видов на конкретных предприятиях.

Значения нормируемых показателей качества бетонов следует определять путем испытания специально изготовленных контрольных образцов или испытания бетона в конструкциях по стандартизированным методам.

Значения нормируемых показателей качества бетонов допускается определять несколькими методами, при этом должна быть обеспечена сравнимость результатов путем установления переходных коэффициентов или другими способами.

Соответствие показателей качества бетонов проектным требованиям устанавливают оценкой результатов испытаний с помощью показателей однородности контролируемого показателя качества.

Конструирование и расчет фибробетонных слоев усиления следует выполнять в соответствии с требованиями СНиП 32-03-96 с учетом положений «Пособия по расчету и конструированию аэродромных покрытий».

Производство и контроль качества работ при устройстве фибробетонных слоев усиления покрытий аэродромов следует осуществлять в соответствии с требованиями ВСП 32-01-02/МО РФ.

3.2. Требования к материалам

Для устройства фибробетонных слоев усиления покрытий аэродромов следует применять фибробетон классов по прочности на растяжение при изгибе $B_{тб}$ 4,8; $B_{тб}$ 5,2; $B_{тб}$ 5,6; $B_{тб}$ 6,0; $B_{тб}$ 6,4; $B_{тб}$ 6,8; $B_{тб}$ 7,2. При этом класс по прочности на сжатие должен быть не менее В30.

Марку по морозостойкости фибробетона следует назначать в соответствии с требованиями СНиП 32-03-96 для верхних слоев покрытий аэродромов.

Фибробетонная смесь перед уплотнением ее рабочим органом бетоноотделочной машины должна соответствовать марке по удобоукладываемости П1 по ГОСТ 7473 (осадка конуса 1–4 см). Конкретные значения подвижности смеси в пределах указанной марки устанавливает лаборатория.

Для приготовления фибробетона для слоев усиления аэродромных покрытий следует применять портландцемент ПЦ 550-ДО-Н и ПЦ 600-ДО-Н, допускается применение портландцемента ПЦ 500-ДО-Н для классов бетона по прочности на растяжение при изгибе не более $B_{тб}$ 5,6. Используемый портландцемент должен удовлетворять требованиям ГОСТ 10178.

В качестве мелкого заполнителя применяют природные средние и крупные пески по ГОСТ 8736. Загрязненность песка глинистыми, пылеватыми и илистыми частицами не должна превышать 3 % по массе. Наличие в песке комков глины не допускается.

В качестве крупного заполнителя применяют щебень из изверженных и метаморфических пород, отвечающий требованиям ГОСТ 8267 и ГОСТ 26633.

Рекомендуемая фракция щебня 5(3)–10 мм, используемая в качестве крупного заполнителя фибробетона. Допускается использование щебня фракции 5(3)–20 мм.

Содержание в щебне зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы для фибробетона слоя усиления не должно превышать 25 % по массе.

Содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне из изверженных и метаморфических пород не должно превышать 1 %.

Морозостойкость щебня должна быть не ниже марки фибробетона по морозостойкости.

Для дисперсного армирования используют стальную фибру. Для приготовления фибробетона класса по прочности на растяжение при изгибе не выше $B_{тб} 5,6$ допускается использование базальтового волокна. Рекомендуется применение профилированной фибры или фибры с изогнутыми концами, за счет указанных характеристик увеличивается сцепление фибры с бетоном и повышается анкерующая способность.

В Беларуси для строительства сооружений используется бетон с прочностью не более 60 МПа. В то же время во всех индустриально развитых странах широко применяется высокопрочный бетон прочностью на сжатие выше 60 МПа. А это позволяет существенно снизить материалоемкость и повысить долговечность конструкций сооружений и, прежде всего, мостовых, работающих в особо тяжелых условиях. В Евросоюзе высокопрочный бетон включен в нормативные документы, что заложило прочную основу для его применения.

Высокопрочный бетон получают с использованием высокодисперсных кремнеземистых добавок, например, микрокремнезема и пластификаторов (суперпластификаторов), при этом водоцементное (В/Ц) отношение должно быть не больше 0,4, что обеспечивает уменьшение пористости и повышение прочности матрицы цементного камня.

Высокодисперсные добавки (ВД) положительно влияют на структурообразование бетона (эффект микронаполнителя) [32]. Этот эффект проявляется в том, что мелкие частицы ВД обычно имеют более тонкий гранулометрический состав, чем портландцемент. При увеличении объемной концентрации ВД снижается пористость цементного камня в бетоне. Но при достижении максимума наполнения высокодисперсной добавкой происходит уменьшение прочности бетонов вследствие ухудшения сцепления цементного камня с заполнителем, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня. В смешанной системе цемента с высокодисперсными добавками желательно, чтобы дисперсные частицы ВД не обволакивали поверхность образующихся фаз и не препятствовали срастанию между кристаллогидратами. Это условие может быть соблюдено при оптимизации объемной концентрации высокодисперсной добавки в смешанной системе с учетом ее гидравлической активности.

Для инертной микродобавки оптимальной дозировкой может быть объем, сопоставимый с объемом капиллярных пор и необходимый для заполнения соответствующих пустот, а также уплотне-

ния структуры [33]. Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности дисперсного материала. Экспериментальные данные [34] на цементном тесте с добавкой микрокремнезема показали, что она ускоряет гидратацию портландцемента уже в первые часы после затворения. На субмикроскопических частицах кремнеземистой добавки происходит осаждение продуктов гидратации, причем эти частицы служат центрами нуклеации и кристаллизации. Через одни сутки гидратационного процесса на поверхности частиц происходит хемосорбция OH^- , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ из жидкой фазы, а через 3 суток начинается пуццолановая реакция.

Повышение прочности вяжущих при введении в их состав высокодисперсных добавок, помимо гидравлической активности, также может быть объяснено образованием наиболее мелкими зернами добавок центров кристаллизации в контактной зоне цемента. «Эффект микронаполнителя» невозможно объяснить только образованием дополнительных центров кристаллизации, поскольку непосредственное их действие заключается в ускорении начальной стадии химического твердения [35, 36, 37]. В основе «эффекта микронаполнителя» лежат как химические процессы взаимодействия цемента с продуктами гидратации, так и физико-химические явления, например, влияние поверхностной энергии частиц высокодисперсных добавок.

В присутствии ВД в бетонах происходит упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. В портландцементных бетонах без ВД зона контакта обычно менее плотная, чем цементное тесто, и включает большое количество пластинчатых кристаллов гидроксида кальция, у которых продольная ось перпендикулярна поверхности заполнителя. Следовательно, она более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях, возникающих при изменениях обычных условий температуры и влажности. Таким образом, контактная зона из-за своей структуры является наиболее слабой зоной в бетоне и поэтому оказывает большое влияние на его прочность. Введение высокодисперсных кремнеземистых добавок в значительной степени снижает капиллярную пористость контактной зоны за счет резкого уменьшения общего содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Положительное влияние на микроструктуру контактной зоны достигается введением сравнительно небольшого количества мине-

ральной добавки, например, микрокремнезема. Исследование влияния кремнеземистой добавки на поверхность раздела заполнителя и цементного камня в высокопрочном бетоне показало, что в промежуточной зоне между заполнителем и цементной матрицей, не содержащей микрокремнезема, наблюдается тонкий поризованный слой, в порах которого обнаружены этtringит и CSH. Такой слой отсутствует в бетоне с добавкой микрокремнезема [38, 39].

В цементных системах, содержащих гидравлически активные минеральные добавки, происходит образование при твердении дополнительного количества CSH за счет взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с активным кремнеземом или алюмосиликатом наполнителя. Следствием этих процессов является образование дополнительных фазовых контактов (контактов срастания между кристаллогидратами) и увеличение плотности цементного камня, что определяет высокую прочность цементной системы. Исследование микроструктуры бетона с низким исходным водоцементным отношением ($\text{B}/\text{Ц} = 0,24$) и добавкой аморфизованного микрокремнезема в количестве 6 % показало отсутствие крупных пластинчатых кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и игольчатых кристаллов этtringита, что обеспечивает высокую плотность цементной матрицы [38].

Такая структура обуславливает высокую прочность бетона, как в ранние, так и в поздние сроки твердения. С увеличением удельной поверхности высокодисперсной минеральной добавки прочность бетона возрастает. Многие авторы [40, 41] объясняют это тем, что помол добавок способствует увеличению их активности в цементных системах. Так, помол золы-уноса до удельной поверхности 0,4–0,6 м²/г обеспечивает разрушение агломератов зольных частиц, обнажает активные поверхности стекловидных глобулитов [42, 43], что способствует повышению активности зол в цементных системах. Введение тонких частиц минеральных добавок, обычно имеющих размеры 1–20 мкм, должно усиливать влияние портландцементных зерен на снижение пористости в бетонной смеси, что снижает потребность в воде для получения бетона заданной консистенции [37].

При введении в бетон взамен части цемента золы-уноса, состоящей из сферических частиц с гладкой остеклованной фактурой поверхности, подвижность бетонной смеси возрастает, благодаря уменьшению внутреннего трения бетонной смеси. Причем, чем дисперснее зола, а следовательно, чем больше в ней остеклованных

шарообразных частиц, тем большее пластифицирующее действие оказывает она на бетонную смесь.

Минеральными пластификаторами могут служить только частицы коллоидно-молекулярного и ионного размера, образованные в результате химических реакций. Частицы коллоидных размеров создают на своей поверхности сольватную оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы, что придает им смазочные функции, облегчая скольжение твердых частиц одна по другой за счет действия отталкивающих сил и образования ориентированными молекулами воды плоскостей скольжения по местам более слабых водородных связей. Таким образом, количество свободной воды, определяющей текучесть, сокращается на величину, сравнимую с объемом ультрадисперсной добавки, а вязкость системы соответственно повышается по мере увеличения в ней объемной концентрации микронаполнителя. Но с другой стороны, адсорбционная пленка уменьшает межмолекулярное взаимодействие твердой фазы и, снижая силу сцепления между частицами на два порядка, ослабляет коагуляционные контакты, придавая им обратимый характер. Поэтому смешанная система с ультрадисперсной добавкой из-за ослабленных коагуляционных контактов при получении вибрационного импульса разжижается. После прекращения вибрационного воздействия коагуляционные контакты восстанавливаются, система может быстро структурироваться и снова становиться вязкой, что является признаком тиксотропности.

Рассмотрев теоретические аспекты создания высокопрочных бетонов для мостовых конструкций можно заключить:

– высокодисперсные добавки положительно влияют на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций: снижают общую пористость цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя, связывают гидроксид кальция аморфизированным микрокремнеземом, повышают активность минеральных добавок при их тонком измельчении, ускоряют начальную стадию химического твердения цементных систем с высокодисперсными частицами добавок, служащими центрами кристаллизации, образуют кластеры «вяжущее-добавка» за счет высокой поверхностной энергии частиц ВД, упрочняют контактную зону между цементным камнем и заполнителями в бетоне;

– высокопрочные бетоны значительно быстрее набирают прочность, чем традиционные. Причиной этому служит низкое водоце-

ментное отношение, а также более активное выделение тепла вследствие быстрой гидратации цемента. Нарастание прочности на растяжение и модуля упругости по времени происходит еще быстрее, чем рост прочности на сжатие. Благодаря малому объему капиллярных пор скорость проникновения жидких и газообразных веществ в высокопрочный бетон значительно ниже аналогичных показателей бетонов обычной прочности, что обеспечивает их более высокую устойчивость к химическому воздействию;

– при оценке долговечности высокопрочных бетонов прогнозирование образования трещин, возникающих на поверхности бетона или в матрице вследствие, например, аутогенной усадки, представляется проблематичным. Процессы, которые с течением времени вызывают деформацию ползучести, усадку из-за испарения влаги в окружающую среду, аутогенную усадку вследствие внутреннего высыхания и др., как правило, также характерны и для высокопрочных бетонов. Благодаря хорошему соотношению прочности к объемной, высокой плотности и долговечности, высокопрочный бетон используется для решения различных практических задач строительства.

Благодаря современной технологии, производство высокопрочного бетона не представляет принципиальных трудностей. Достижение проектных параметров, а также выбор оптимального состава бетона при использовании высокодисперсных добавок и суперпластификаторов требуют научного исследования и экспериментальной проверки его качества.

В связи с этим, целью исследования является разработка технологии приготовления и состава высокопрочного бетона с использованием высокодисперсных минеральных добавок и суперпластификатора.

Для решения поставленной задачи были использованы:

– цемент марки М-500, ОАО «Красносельскстройматериалы» ПЩ-Д0, с тонкостью помола 96,5 %, истинной плотностью 3,1072 г/см³, величиной удельной поверхности 3406 см²/г, активностью 51,4 МПа;

– щебень с максимальной крупностью зерен до 20 мм. Физико-механические свойства щебня: плотность 2692 кг/м³, влажность 0,16 % масс., содержание глинистых и пылеватых частиц 0,12 % масс., марка щебня 1200, соответствует ГОСТ 8267;

– песок кварцевый для строительных работ, ГОСТ 8736, с модулем крупности Мк 2,14;

– микрокремнезем марки МК-85 (ТУ 5743-048-02495332), подвергшийся активации при температуре 105–115 °С. Характеристика микрокремнезема после активации: истинная плотность 2,2345 г/см³, удельная поверхность 21,86 м²/г, в уплотненном состоянии с насыпной плотностью 174 кг/м³;

– зола от сжигания бурых углей Житковичского месторождения (Республика Беларусь) следующего химического состава, (масс. %): SiO₂ – 64,35; Al₂O₃ – 10,63; Fe₂O₃ – 2,39; CaO – 13,10; MgO – 1,66; MnO – 0,73; K₂O – 2,0; Na₂O – 1,37; TiO₂ – 1,30; P₂O₅ – 0,09; SO₃ – 2,38. Потери при прокаливании – 0,2 % масс.;

– суперпластификатор – натриевая соль сульфоксида ароматических углеводов и конденсации с формальдегидом тип 1 (НСАУКФ-1) получен на кафедре мостов и тоннелей БНТУ по следующей технологии: 1 масс. часть оксида ароматического нефтепродукта (оксида экстракта селективной очистки масел) обрабатывалась 20 %-ным олеумом в количестве 1 масс. части в течение 60 минут при температуре 145 °С; реакцию массу обрабатывали формальдегидом (формалином) из расчета 1 масс. часть продуктов сульфирования и 1,2 масс. частей формальдегида, конденсацию осуществляли при температуре 125 °С в течение 3 часов при атмосферном давлении, затем реакцию массу нейтрализовали 42,5 %-ной гидроокисью натрия. Оксидат получают путем каталитического окисления ароматических нефтепродуктов, например, экстракта селективной очистки масел, в присутствии 0,5–3 % масс. кальцинированной соды при температуре 110–220 °С, расходе воздуха 5–8 л/мин в течение 45–180 минут при атмосферном давлении. Характеристика суперпластификатора НСАУКФ-1: массовая доля сухих веществ 62,9 %, плотность при 20 °С 1,2761 г/см³, показатель активности водородных ионов 8,24;

– для затворения бетонных смесей использована водопроводная вода, которая отвечает требованиям СТБ 1114.

В случае производства крупногабаритных мостовых конструкций целесообразно комбинировать портландцемент с золой от сжигания твердого топлива, что учтено при выполнении исследования путем использования золы от сжигания бурого угля Житковичского месторождения.

Технология приготовления бетонной смеси: цемент и золу от сжигания бурых углей подвергали домолу в мельнице, вводили суперпластификатор НСАУКФ-1 и смесь опять подвергали домолу с получени-

ем высокодисперсной массы, имеющей удельную поверхность не менее 3700 см²/г, вводили мелкий и крупный заполнители, содержащее перемешивали и добавляли воду. Полученной смесью заполняли формы и после отверждения образцы бетона подвергали испытаниям.

3.3. Составы и испытания высокопрочных бетонов

Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, полученных из этих смесей, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов

Наименование	Номер состава			
	1	2	3	4
Составы бетонных смесей, масс. %:				
щебень	48,7	48,7	48,7	48,7
песок	22,4	22,8	23,6	22,4
цемент ПЦ-500	22,1	22,1	22,1	22,1
вода	6,8	6,4	5,6	6,8
Добавки в % от массы цемента:				
миккремнезем МК-85	10	12	12	14
зола	6	8	8	8
суперпластификатор НСАУКФ-1	0,9	1,2	1,2	1,2
Физико-механические показатели бетона:				
плотность, кг/м ³	2329	2342	2347	2351
предел прочности при осевом сжатии, МПа	123	136	138	114
предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	12,4	13,9	14,1	11,3
пористость, %	6,2	5,3	5,1	5,2
водопоглощение, %	2,1	1,9	1,8	2,3
морозостойкость, число циклов	>600	>600	>600	>600

Из табл. 3.1 видно, что при содержании в бетонной смеси высокодисперсных добавок: 10–14 % масс. миккремнезема МК-85, 6–8 % масс. золы от сжигания бурого угля Житковичского месторож-

дения, 0,9–1,2 % масс. суперпластификатора НСАУКФ-1, предел прочности бетона при осевом сжатии находится в пределах 114–138 МПа, а предел прочности на растяжение при изгибе 11,3–14,1 МПа. При этом другие физико-механические показатели бетона соответствовали требованиям современных стандартов или превышали их. Таким образом, получены высокопрочные бетоны, которые после опытно-промышленной проверки смогут быть использованы для изготовления мостовых конструкций.

Выводы по главе 3

Применение разработанного высокопрочного бетона для создания мостовых сооружений обеспечит следующие преимущества:

- более высокую плотность, водо- и газонепроницаемость за счет низкого содержания капиллярных пор;

- повышенную стойкость к агрессивной окружающей среде, что и обеспечит более высокую долговечность мостовых конструкций;

- сокращение расхода бетона и арматуры и, соответственно, транспортноремонтной и монтажной массы, более высокую начальную прочность, раннюю распалубку и предварительное обжатие, что обеспечит уменьшение сроков ввода в эксплуатацию сооружения.

- уменьшение поперечного сечения при сохранении и/или увеличении несущей способности конструкций, работающих, прежде всего, на изгиб;

- увеличение длины пролетов мостовых конструкций.

Использование высокодисперсных минеральных добавок и, прежде всего, зол от сжигания твердого топлива будет способствовать увеличению долговечности и эксплуатационной надежности мостов, а также расширению сырьевой базы для изготовления бетонных и железобетонных конструкций, а также защиты окружающей среды от загрязнений. Повышение долговечности мостовых конструкций позволяет увеличить межремонтный период для указанных сооружений, что приведет к значительной экономии материальных и трудовых ресурсов.

В ближайшем будущем произойдет постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными. В таких бетонах будут использоваться как химические модификаторы, так и комплексные добавки различного функционального назначения, улучшающие удобоукладываемость бетонных смесей и способствующих существенному повышению физико-механических показателей бетона.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1. Материалы и технология изготовления образцов

Для приготовления высокопрочного бетона водоцементное соотношение в исследовании составляет от 0,28 до 0,32. Гранулометрический состав заполнителя соответствует рекомендуемым пределам стандартов Беларуси, так как для приготовления составов используют материалы отечественного производства:

- цемент марки М 500 ПЦ-Д0;
- песок кварцевый для строительных работ (ГОСТ 8736);
- щебень с максимальной крупностью фракции до 20 мм (ГОСТ 8267);
- суперпластификатор «полипласт СП-1» – смесь натриевых солей, полиметиленафталинсульфоокислот различной молекулярной массы по ТУ 5870-005-58042865-05 (ГОСТ 24211-2003);
- для затворения бетонных смесей применяют водопроводную воду, которая отвечает требованиям СТБ 1114;
- полипропиленовая фибра RS-20/8 (ТУ 2272-006-1349727-2007). Диаметр фибр – 20 мкм, длина – 8, 12 и 20 мм.

В соответствии с инструкцией стандарта ASTM C192 для приготовления образцов первоначально в бетономешалку подают щебень и 1/5 часть воды. При вращении щебень равномерно увлажняется водой, в этот момент добавляют песок, и перемешивание продолжается. Полипропиленовую фибру засыпают в сухую смесь перед добавлением воды. После перемешивания фибры, песка и щебня в бетономешалку добавляют цемент и остаток воды. После добавления воды перемешивание продолжается в течение трех минут, после этого оборудование выключают. После трех минут ожидания перемешивание возобновляют в течение двух минут. После приготовления бетонную смесь заливают в формы и уплотняют с помощью вибратора. Образцы выдерживают в течение 24 часов во влажной среде. Для набора проектной прочности бетона, опытные образцы хранят в течение 28 суток в воде.

Проведение исследований включает несколько этапов. На каждом этапе использовали различные составы в кг/м³:

- вода 150–165;
- цемент 500–565;

- крупный заполнитель 934–1155;
 - мелкий заполнитель 582–824;
 - суперпластификатор 6–20; фибра полипропиленовая 0–2,7.
- Испытания образцов проводят в соответствии с ТКП 45-1.01-221.

4.2. Исследования влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на его предел прочности при сжатии

Контрольные образцы испытывают на осевое сжатие до разрушения, и прочность бетона на осевое сжатие вычисляют по формуле (4.1).

$$f_c = \frac{F}{A} \cdot \alpha, \quad (4.1)$$

где f_c – максимальное сжимающее напряжение в бетоне при одноосном напряженном состоянии, МПа;

F – разрушающее усилие, Н;

A – площадь поперечного сечения образца, мм²;

α – масштабный коэффициент, учитывающий переход к прочности базовых образцов размером 150×150×150 мм.

В работе используют следующие приборы и материалы:

- пресс гидравлический;
- весы технические;
- штангенциркуль;
- металлическая линейка;
- образцы-кубы с ребром 150 мм, содержащие полипропиленовые волокна длиной 12 мм и не содержащие их.

Для проведения опытов готовят составы бетонной смеси.

Прочности бетона при сжатии определяют на образцах-кубах размером 150×150×150 мм. Образцы выдерживают в камере в нормально-влажностных условиях 28 суток, затем их визуально осматривают и напильником удаляют дефекты в виде наплывов на ребрах и опорных гранях. При наличии трещин, сколов ребер глубиной более 10 мм или раковин диаметром более 10 мм и глубиной более 5 мм образцы отбраковывают. Затем на образцах определяют опорные грани с учетом направления сжимающего усилия параллельно слоям укладки

бетонной смеси. Размеры образцов-кубов измеряют металлической линейкой с точностью до 1 мм, массу определяют на технических весах. Рабочую площадь сечения образца (мм^2) определяют, как среднее арифметическое значение площадей обеих опорных граней.

После извлечения образцов из камеры нормально-влажностного твердения их до испытания выдерживают в течение 4 ч в помещении лаборатории при температуре воздуха в пределах 20 ± 5 °С и относительной влажностью воздуха в пределах 60 ± 5 %.

Шкалу силоизмерителя пресса выбирают из условия, что ожидаемое разрушающее усилие должно быть в пределах 20–80 % максимальной нагрузки F_{max} . Нагружение производят непрерывно до разрушения, со скоростью возрастания усилия, соответствующего увеличению напряжения в образце $0,6 \pm 0,4$ МПа/с. Образцы для испытаний представлены на рисунках 4.1–4.3.

Максимальное усилие, которое было достигнуто в процессе нагружения принимают за разрушающее усилие F .

Предел прочности при сжатии бетона, Мпа, вычисляют по формуле (4.1) как отношение разрушающего усилия F (Н) к первоначальной площади поперечного сечения образца A (мм^2).

Значение предела прочности на сжатие бетона f_{cm} вычисляют с точностью до 0,1 Мпа как среднее арифметическое значение в серии опытных образцов:

- из двух образцов – по двум образцам;
- из трех образцов – по двум наибольшим по прочности образцам;
- из четырех образцов – по трем наибольшим по прочности образцам;
- из шести образцов – по четырем наибольшим по прочности образцам.

F_{cm} – среднее значение прочности бетона на осевое сжатие, получаемое по результатам испытаний серии опытных образцов.

Исследования показали, что содержание полипропиленовой фибры уменьшает потерю сопротивления при сжатии. Оптимальное содержание полипропиленовых волокон в бетоне составляет 0,6–1,2 кг/м³, при этом его предел прочности при сжатии составил 76,8–81,0 МПа.



Рис. 4.1. Образцы в камере в нормально-влажностных условиях



Рис. 4.2. Образцы перед испытанием



Рис. 4.3. Образцы до испытания на сжатие

4.3. Влияние размера полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на его предел прочности при сжатии

Образцы-кубики с размером ребра 150 мм изготавливают из подобранных составов бетонных смесей. Дозировка полипропиленовой фибры длиной 8, 12, 20 мм определяется стандартной фасовкой по 0,6 и 0,9 кг и составляет величину, кратную фасовке: 0,6; 0,9; 1,2; 1,8; 2,4 и 2,7 кг/м³. Образцы каждого состава испытывают на сжатие в возрасте 7 и 28 суток.

В результате испытаний волокна фибры любой длины создают над трещинами связующую сетку.

Оптимальная длина полипропиленовых волокон составляет 12 мм. При этой длине предел прочности при сжатии образцов бетона составляет максимальное значение. Увеличение длины фибры до 20 мм несколько снижает предел прочности при сжатии образцов.

Образцы бетона без полипропиленовых волокон после нагружения полностью разрушаются (рис. 4.4), тогда как образцы с полипропиленовыми волокнами сохраняют свою геометрию (рис. 4.5), при этом в бетоне с волокнами на месте разрушения появляются трещины вдоль направления нагрузки с равномерным распределением.



Рис. 4.4. Образец без полипропиленовых фибр после испытания



Рис. 4.5. Образцы, армированные полипропиленовой фиброй, после испытания на сжатие

4.4. Исследование влияния количества полипропиленовых волокон, армирующих бетон, на предел прочности на растяжение при изгибе

Полипропиленовое фиброволокно применяют для дисперсного армирования изделий, работающих на изгиб, например, тоннельных обделок или мостовых конструкций. Дисперсное армирование бетона полипропиленовой фиброй сдерживает процесс образования микротрещин в «опасных» сечениях и «залечивает» дефекты в структуре бетона. В результате возрастает прочность бетона на растяжение, а следовательно, повышается и несущая способность труб.

Для определения оптимального объемного содержания фиброволокна готовят бетонные призмы размером $15 \times 15 \times 600$ см. Образцы различаются весовым содержанием полипропиленовой фибры ($\text{кг}/\text{м}^3$) в бетонной смеси, что обусловлено весом упаковки (0,6 и 0,9 кг). В исследовании используют заводской состав бетонной смеси, при-

меняемый при изготовлении железобетонных безнапорных труб (на 1 м^3 по массе):

- портландцемент М 500 – 420 кг;
- щебень фр. 5–20 – 1130 кг;
- кварцевый песок с Мк. 1,3–1,5 – 750 кг;
- вода – 150 л.

Фиброволокно вводят с мелким и крупным заполнителем, время перемешивания составляет 3 мин. Пробы бетона отбирают в процессе формовки труб. Для выравнивания и уплотнения жесткой бетонной смеси используют специальный пригруз. Набор прочности бетона происходит в условиях естественного твердения при нормальных температурно-влажностных условиях. В возрасте 28 суток призмы испытывают на изгиб, а их половинки на сжатие.

Схема испытания бетонной призмы, армированной полипропиленовыми волокнами, отображена на рис. 4.6.

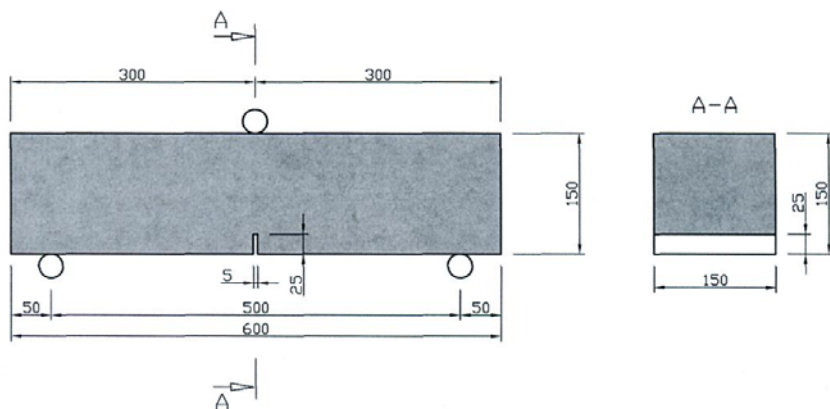


Рис. 4.6. Схема испытания образца на растяжение при изгибе

Для испытаний используют пресс гидравлический малогабаритный с диапазоном нагрузок 5–1000 кН и ценой деления 0,01 кН.

Уход за уложенной фибробетонной смесью осуществляют в соответствии с требованиями СП 70.13330 (СНиП 3.03-01-87) при относительной влажности 90–100 % и температуре 18–25 °С.

Прочность дисперсно-армированного образца на одноосное сжатие определяют на кубках, призмах или цилиндрах. Отклонения от

плоскостности опорных поверхностей кубов, призм и цилиндров, прилегающих к плитам прессы, не должны превышать $\pm 0,001$ наименьшего размера образца. Отклонения от перпендикулярности смежных граней кубов и призм, а также опорных поверхностей и образующих цилиндров, предназначенных для испытания на сжатие, не должны превышать 1 мм. Требования к подготовке, твердению, транспортировке и хранению образцов должны соответствовать ГОСТ 10180. Температура воздуха при испытании образцов равна 20 ± 5 °C или 25 ± 5 °C в жарком климате при относительной влажности воздуха не менее 55 %. В этих условиях образцы должны быть выдержаны до испытания в распалубленном виде при твердении в воде в течение 24 ч, и в течение 4 ч при твердении в воздушно-влажностных условиях или в условиях тепловой обработки. В помещении для испытания образцов следует поддерживать температуру воздуха 20 ± 5 °C или 25 ± 5 °C в жарком климате и относительную влажность воздуха не менее 55 %. На образцах отмечают грани для приложения усилий. Сжимающая сила при испытании должна быть направлена параллельно слоям укладки бетонной смеси в формы. Линейные размеры образцов измеряют с погрешностью не более 1 % и записывают в журнал испытаний. Если опорные грани образцов-кубов или цилиндров не удовлетворяют требованиям, то их выравнивают шлифованием. Образцы одной серии испытывают в расчетном возрасте в течение не более 1 ч. Шкалу силоизмерителя испытательной машины выбирают из условия, что ожидаемое значение разрушающей нагрузки должно быть в интервале 20–80 % максимальной нагрузки, допускаемой выбранной шкалой. Нагружают образец с постоянной скоростью, равной, $0,6 \pm 0,2$ МПа/с. После приложения первоначальной нагрузки, не превышающей 30 % разрушающей нагрузки, прикладывают нагрузку к испытываемому образцу и непрерывно увеличивают с заданной постоянной скоростью ± 10 % до разрушения (рис. 4.7). Регистрируют установленную максимальную нагрузку в МПа.

Применение полипропиленовой фибры с расходом обеспечивает повышение средней прочности бетона при осевом растяжении.



Рис. 4.7. Испытание бетонной призмы

4.5. Волокна для бетона и смеси из них

Стандарт СТБ EN 14889 «Волокна для бетона. Часть 2» определяет полимерные волокна следующим образом: «полимерные материалы, такие как полиолефины, например, полипропилен или полиэтилен, полиэстер, полиакрил, арамиды и смеси из них».

Одновременное использование волокон разной длины сокращает количество микро- и макротрещин. Короткие волокна снижают количество микротрещин и значительных дислокаций напряжений. Длинные волокна при высоких нагрузках снижают число дискретных микротрещин. Бетон, в котором фибра распределена равномерно, оптимально воспринимает нагрузки и имеет повышенную эксплуатационную надежность. В идеале фиброволокна должны находиться в каждой секции структурных элементов, образующих бетон. Таким образом, комбинированное применение волокон разной длины предотвращает развитие процессов трещинообразования, вызванных растягивающими и изгибающими нагрузками.

Дисперсное армирование повышает долговечность бетона в условиях пониженных температур, агрессивного воздействия водных растворов. На стадии структурообразования при пластической

усадке напряжения перераспределяются от наиболее опасных зон на весь объем материала. Происходит замедление темпов роста трещин в процессе эксплуатации, снижение концентрации напряжений в области макродефектов, выравнивание и перераспределение напряжений в структуре бетона. Применение дисперсного армирования снижает концентрацию напряжений, предотвращает развитие встречных трещин и затрудняет процесс трещинообразования.

Корректируя соотношение объемов различных волокон в бетоне, можно направленно регулировать свойства, повышая его трещиностойкость, не только обеспечивая качественное улучшение стойкости материала под нагрузкой, но и повышая коррозионную стойкость, обусловленную ростом внутренних напряжений, а также атмосферостойкость, стойкость к переменному увлажнению/высушиванию, замораживанию/оттаиванию и другим циклическим процессам.

Результаты исследований подтвердили высокую эффективность полипропиленовых волокон в качестве армирующей добавки в бетон. Использование полипропиленовых волокон уменьшает риск потери несущей способности высокопрочного бетона, добавок увеличивает его гибкость. За счет высокого сопротивления эти волокна предотвращают появление трещин и сопротивляются их увеличению. Добавление фибр увеличивает сопротивление бетона при сжатии, и с увеличением их содержания в объеме бетона этот показатель возрастает.

Полипропиленовые волокна при дисперсном армировании мостовых и тоннельных конструкций улучшают их физико-механические и эксплуатационные характеристики. Использование полипропиленовых волокон уменьшает риск потери несущей способности. Дисперсное армирование является перспективным вариантом улучшения качества бетонов. Оно обеспечивает трехмерное упрочнение композитов и позволяет принципиально изменять свойства цементного камня, обеспечивая высокую трещиностойкость бетонов, а также повышает его сопротивление ударным и динамическим нагрузкам, создавая необходимый запас прочности, и сохраняет целостность конструкции даже после появления сквозных трещин.

Использование полипропиленовых фибр в мостовых и тоннельных конструкциях снижает образование внутренних микротрещин, а также способствует микроструктурному уплотнению, что является основным фактором повышения долговечности бетона и защиты стальной арматуры.

При исследовании 29 составов бетонных смесей было выявлено, что добавление в бетоны полипропиленовых волокон уменьшает риск потери несущей способности бетонных конструкций. Добавление полипропиленовых волокон в мостовые и тоннельные конструкции позволит избежать хрупкого разрушения и мгновенной потери сопротивления в нормальных и экстремальных условиях.

Испытания на сжатие высокопрочных бетонов показали, что оптимальным является добавление полипропиленовых фибр с волокнами длиной 12 мм.

Составы фибробетона с полипропиленовыми волокнами имеют следующие преимущества:

- более высокую плотность, снижение проницаемости и водопоглощения бетона;
- повышенную морозостойкость и стойкость к химическим воздействиям;
- повышенное сопротивление удару и устойчивость к раскалыванию бетона;
- сокращение расхода бетона, арматуры и, как следствие, транспортировочной и монтажной масс;
- более высокую начальную прочность, что обеспечивает уменьшение сроков ввода в эксплуатацию сооружения;
- уменьшение поперечного сечения конструкций, работающих, прежде всего, на изгиб при сохранении несущей способности;
- увеличение длины пролетов мостовых конструкций;
- повышение долговечности мостовых и тоннельных конструкций, что позволяет увеличить межремонтный период для указанных сооружений и значительно сэкономить материальные и трудовые ресурсы.

Постепенное замещение традиционных бетонов многокомпонентными, в которых будут использоваться как химические модификаторы, так и комплексные добавки различного функционального назначения, улучшит удобоукладываемость бетонных смесей и будет способствовать улучшению физико-механических свойств бетона. С учетом высоких технических показателей и экономичности полипропиленовых фибр предлагается использовать их в бетонах мостовых и тоннельных конструкций. Добавление полипропиленовых волокон в бетоны, используемые для строительства мостов и тоннелей в Республике Беларусь, является перспективной задачей и может применяться на практике.

4.6. Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона

Фибробетон как материал для несущих конструкций применяется более 40 лет, а для конструкций тоннельных обделок – более 20 лет. Дисперсное фибровое армирование компенсирует низкую прочность бетона при растяжении и хрупкость разрушения. По сравнению с обычным стержневым армированием, армирование фиброй позволяет получить экономический эффект при возведении и изготовлении конструкций за счет:

– существенного сокращения трудоемкости изготовления арматурных каркасов, снижения расходов на ремонты конструкций за счет уменьшения внутренних дефектов в виде непровибрированных зон за арматурой и повышения стойкости к циклическим воздействиям (высушивание/увлажнение, положительные/отрицательные температуры, вибрация и т. п.) для сборных, монолитных и набрызгбетонных конструкций;

– повышенной устойчивости закрепленной выработки, более высокой безопасности работы при креплении выработки набрызгбетонном в процессе проходки тоннелей, более быстрого и безопасного проведения работ по восстановлению в случае аварийной ситуации – при применении фибронабрызгбетона.

Монолитные, сборные и набрызгбетонные из ФБ или ФЖБ ограждающие несущие конструкции (обделки) и внутренние несущие конструкции тоннельных сооружений должны отвечать требованиям прочности, эксплуатационной надежности, долговечности, огнестойкости (в соответствии с СП 32-105, СП 120.13330, СП 122.13330, СП 70.13330, СП 52-104) и устойчивости к различным видам агрессивного воздействия внешней среды (СП 28.13330) с учетом СП 131.13330 и ГОСТ 9.602), в том числе при строительстве в сейсмических районах (СП 14.13330).

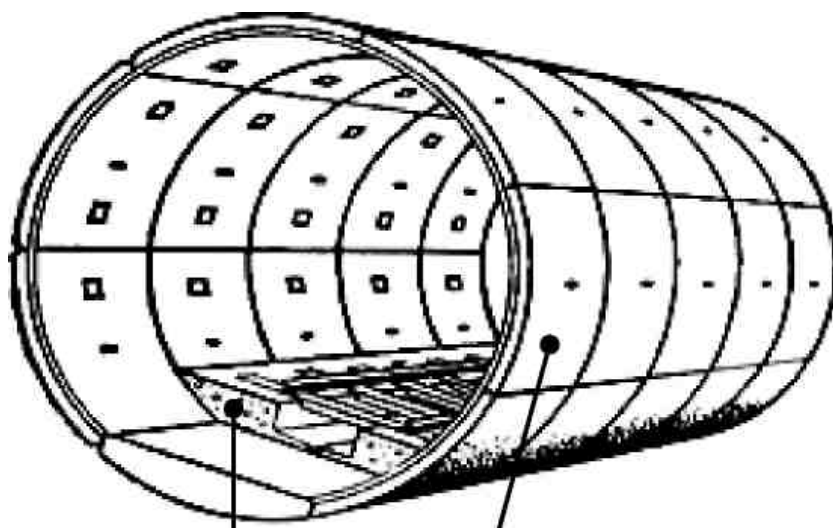
Выбор конструктивных решений ФБ конструкций транспортных тоннелей производят, исходя из технико-экономической целесообразности их применения в конкретных условиях строительства с учетом максимального снижения их материало-, трудо- и энергоемкости, стоимости, повышения долговечности и увеличения межремонтного ресурса.

ФБ рекомендуется применять в конструкциях и сооружениях, в которых существенное значение имеют снижение собственного веса, уменьшение раскрытия трещин, обеспечение водонепроницаемости бетона, повышение его ударной стойкости, сопротивления истиранию и долговечности. Примеры применения ФБ в тоннельных конструкциях приведены в таблицах и на рис. 4.8–4.11.

Фибронабрызгбетон при нанесении:

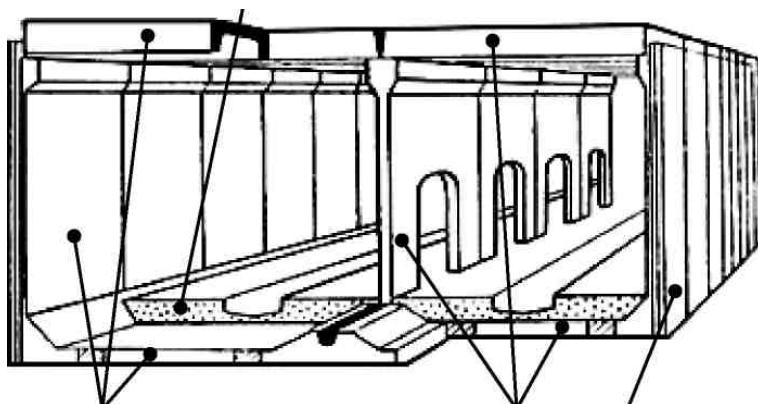
- сухим способом;
- мокрым способом.

Выбор вида фибры и ее количество зависит от требуемого класса бетона по прочности на сжатие, определяемого по ГОСТ 10180, класса бетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе, а также от уровня ответственности конструкции или сооружения, с учетом условий эксплуатации.



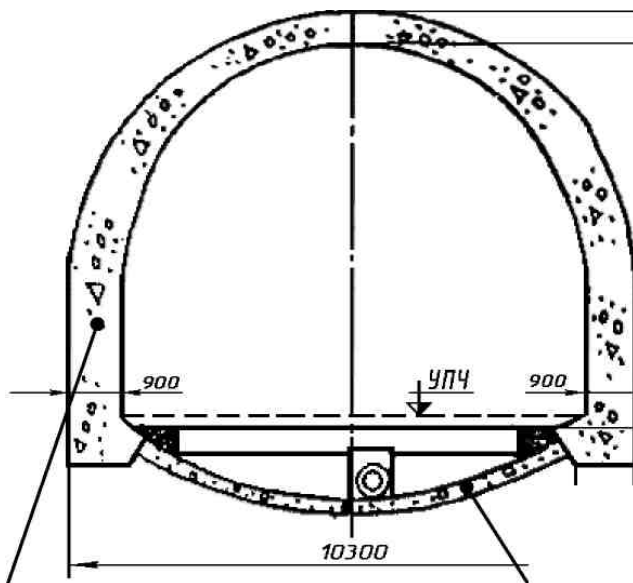
<p><u>Путевой бетон</u> СФБ или ПФБ В20BF≥1bW6F100 (П3)</p>	<p><u>Блоки сборной обделки</u> СФБ, СФЖБ или ПФЖБ В≥35BF≥5b W≥ 6F≥100 (П1–П2)</p>
---	--

Рис. 4.8. Фибробетон в тоннельных конструкциях



Блоки стеновые, плиты лотка и перекрытия СФЖБ или ПФЖБ
 $B \geq 30$ $B_f \geq 3b$ $W \geq 4$ $F \geq 150$ (П1-П2)

Рис. 4.9. Применение фибробетона в конструкциях тоннелей метрополитена



Монолитная обделка
 СФБ, ПФБ, СФЖБ или ПФЖБ
 $B \geq 20$ $B_f \geq 1,5b$ $W \geq 4$ $F \geq 150$ (П3-П5)

Обратный свод монолитной обделки
 ФЖБ или ПФЖБ
 $B \geq 20$ $B_f \geq 2,5b$ $W \geq 4$ $F \geq 150$ (П3-П4)

Рис. 4.10. Применение фибробетона в монолитных конструкциях
 автодорожных тоннелей

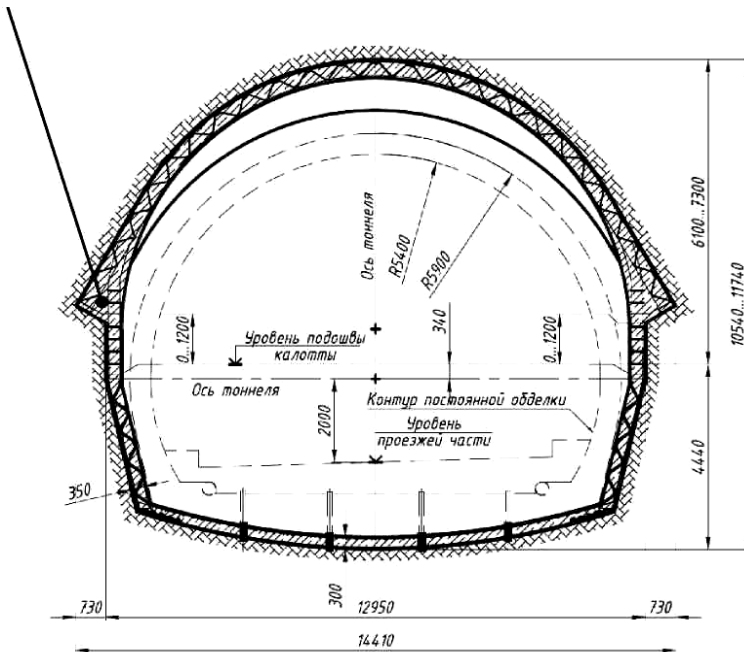
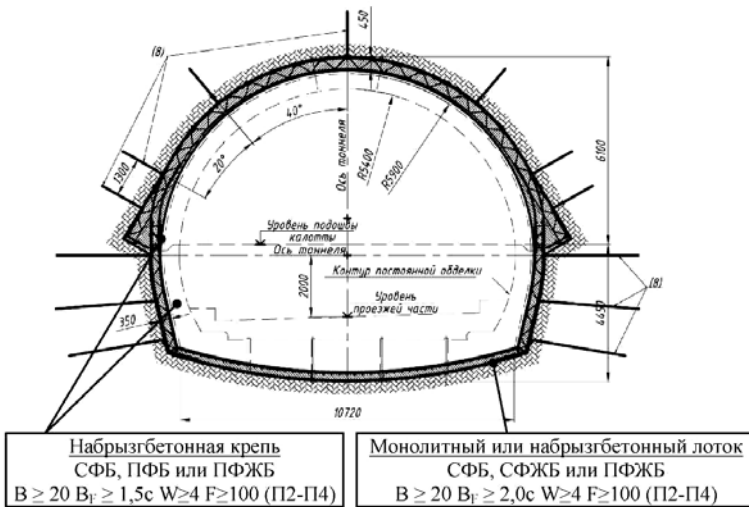


Рис. 4.11. Применение фибронабрызг бетона с арками и (или) анкерами для крепления выработок транспортных тоннелей

Конструкции транспортных тоннелей из ФБ имеют следующие технические преимущества по сравнению с традиционным железобетоном:

- повышенную трещиностойкость, ударную стойкость, вязкость разрушения, износостойкость, морозостойкость, водонепроницаемость, сопротивление кавитации;

- пониженную усадку и ползучесть;

- использование более эффективных конструктивных решений, чем при обычном армировании, например, тонкостенных конструкций, конструкций без стержневой или сетчатой распределительной и поперечной арматуры и др.;

- снижение трудозатрат на арматурные работы, повышение степени механизации и автоматизации производства железобетонных конструкций, например, в сборных блоках обделок, в ребристых плитах покрытий и перекрытий, в сборных колоннах, в балках, в монолитных плитах лотка и обратного свода обделок тоннелей, в дорожных покрытиях и др.

Технико-экономическую эффективность применения ФБ и ФЖБ конструкций следует определять по приведенным затратам, т. к. стоимость ФБ несколько выше, чем стоимость ЖБ.

При выборе конструктивных решений учитывают характеристики материала фибры, методы изготовления, монтажа и условия эксплуатации конструкций.

Форму и размеры сечений элементов следует принимать, исходя из наиболее полного учета свойств ФБ конструкций, возможности заводского механизированного и автоматизированного изготовления, удобства транспортирования и монтажа.

При проектировании ФБ конструкций транспортных тоннелей следует руководствоваться общими положениями и соблюдать расчетные требования СП32-105, СП120.13330 (СНиП 32-02), СП122.13330 (СНиП 32-04), СП 63.13330 (СНиП 52-01), СП 28.13330 (СНиП 2.03), СП 28.13330, ВСН 48, ВСН 126.

Применение ФБ без комбинированного армирования должно быть обосновано расчетами.

Свойства ФБ зависят от свойств исходных материалов, состава бетона-матрицы, геометрических параметров фибры, ее физико-механических характеристик, количества фибры и ее сцепления с

бетоном-матрицей, что должно быть учтено при выборе исходных материалов и проектировании состава ФБ.

Расчет ФБ конструкций необходимо выполнять по предельным состояниям с использованием диаграмм состояния ФБ « σ - ε » и с учетом расчетных характеристик ФБ.

Реализация технических преимуществ ФБ в конструкциях возможна при обеспечении равномерного распределения армирующих волокон в объеме бетона, как на стадии приготовления смеси, так и при ее транспортировке и укладке в форму или конструкцию.

При расчете ФБК среднюю плотность ФБ в зависимости от материала фибр допускается принимать равной:

– 2500 и 2400 кг/м³ для тяжелого бетона-матрицы – для стальной и полимерной фибры;

– 2400 и 2300 кг/м³ для мелкозернистого бетона-матрицы – стальной и полимерной фибры. При наличии конкретных данных о средней плотности ФБ допускается принимать другие значения, обоснованные в установленном порядке.

В рабочих чертежах конструкций из ФБ указывают классы фибробетона по прочности на сжатие (В), класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе (В_F) и материал фибры.

Для несущих ФБ конструкций применяют фибру из материалов, модуль упругости которых изменяется не более чем на 10 % в течение срока службы конструкции и/или при воздействии температуры в диапазоне от –40 °С до +60 °С и влажности до 100 %. Материал фибр должен быть стойким в щелочной среде портландцемента и средах эксплуатации.

При обосновании полной или частичной замены рабочей стержневой арматуры фибровым армированием должны выполняться следующие условия:

$$R_{F0.5,n} / R_{fbt,n} > 0,4; \quad (4.3)$$

$$R_{F2.5,n} / R_{F0.5f,n} > 0,5. \quad (4.4)$$

Нормативная характеристика прочности фибробетона на растяжение при изгибе в момент образования трещины $R_{fbt,n}$ определяется испытанием образцов.

Допускается при предварительных (оценочных) расчетах значение нормативной прочности $R_{fb,t,n}$ принимать равным значению нормативной прочности бетона на осевое растяжение $R_{bt,n}$ (СП 63.13330) для соответствующего класса прочности бетона на сжатие.

Для фибробетонов на основе СФ допускается определять значение $R_{fb,t,n}$ по СП 52-104, используя при этом нормативные значения показателей прочности СФ и бетона.

Фибру другого типа, вида и марки подбирают, проверяя ее в эталонном бетоне.

Необходимо проверять фибру для конкретного проекта и класса бетона по прочности на сжатие В и класса по остаточной прочности V_F для монолитных, сборных конструкций и для набрызгбетона.

В несущих ФБТК должна применяться фибра с прочностью на растяжение не менее 800 МПа для СФ и 500 МПа для ПФ.

Фибру с меньшими значениями прочности на растяжение допускается применять при условии обеспечения проектного класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе для конкретных конструкций, что должно быть подтверждено испытаниями контрольных образцов.

4.7. Расчет элементов фибробетонных конструкций транспортных тоннелей (ФБТК)

Выбор качества материалов, расчет и проектирование ФБТК производят согласно указаниям, изложенным в СП 120.13330 (СНиП 32-02), СП 122.13330 (СНиП 32-04), СП 63.13330 (СНиП 52-01). Должны быть учтены технологические требования по изготовлению конструкций, соблюдены требования по эксплуатации сооружений, а также требования по экологии, устанавливаемые соответствующими нормативными документами. ФБТК должны обеспечивать требуемую надежность конструкций к возникновению всех видов предельных состояний.

Применение ФБТК в средах с агрессивным воздействием допускается при выполнении требований, установленных СП 28.13330 (СНиП 2.03).

ФБТК могут изготавливаться различными технологическими приемами: предварительным приготовлением смеси в заводских условиях или в бетоносмесителях на строительном объекте, уплот-

нением с помощью вибрирования и вакуумирования, роликовым формованием и прессованием, набрызгом и центрифугированием.

Технология изготовления ФТБК должна обеспечивать равномерность распределения фибры в объеме бетона-матрицы.

Расчеты ФБТК производят в соответствии с требованиями СНиП 52-01 по предельным состояниям, включающим:

– предельные состояния первой группы (по полной непригодности к эксплуатации вследствие потери несущей способности);

– предельные состояния второй группы (по непригодности к нормальной эксплуатации вследствие образования или чрезмерного раскрытия трещин, появления недопустимых деформаций и др.).

Расчеты по предельным состояниям ФБТК в целом, а также отдельных ее элементов производят с учетом всех стадий – изготовления, транспортирования, возведения и эксплуатации; при этом расчетные схемы должны отвечать принятым конструктивным и технологическим решениям.

Расчеты ФБТК производят с учетом возможного образования трещин и неупругих деформаций в ФБ и арматуре на основе нелинейной деформационной модели, в соответствии с СП 52-101.

Статические расчеты подземных конструкций, сооружаемых открытым и закрытым способами, могут выполняться методами строительной механики на заданные нагрузки или методами механики сплошной среды. Расчеты обделок тоннелей на заданные нагрузки проводят с учетом отпора грунтового массива, кроме обделок, проектируемых для слабых грунтов (типа пльвунов или илистых грунтов), которые рассчитывают без учета отпора.

При определении внутренних усилий в конструкциях допускается моделирование фибробетона в предположении его линейно-упругой работы. При этом класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе (R_F) должен быть не менее 1,0 МПа.

При проектировании ФБТК их надежность устанавливается путем использования расчетных значений нагрузок и воздействий, наряду с расчетными значениями характеристик материалов, определяемых с помощью соответствующих частных коэффициентов надежности по нормативным значениям этих характеристик с учетом степени ответственности зданий и сооружений.

Нормативные значения нагрузок и воздействий, коэффициентов сочетаний, коэффициентов надежности по нагрузке, коэффициентов

надежности по назначению конструкций, а также подразделение нагрузок на постоянные и временные (длительные и кратковременные) принимают согласно актуальным нормативным документам, область действия которых распространяется на проектируемые конструкции, а также согласно СНиП 2.01.

При расчете элементов сборных ФБТК на воздействие усилий, возникающих при их подъеме, транспортировании и монтаже, нагрузку от массы элементов следует принимать с коэффициентом динамичности, равным 1,60 при транспортировании и 1,40 – при подъеме и монтаже. Допускается принимать более низкие значения коэффициентов динамичности, обоснованные в установленном порядке, но не ниже 1,25.

При расчете по прочности ФБ элементов конструкций на действие сжимающей продольной силы следует учитывать случайный эксцентриситет e_a , принимаемый не менее:

- 1/600 длины элемента или расстояния между его сечениями, закрепленными от смещения;
- 1/30 высоты сечения;
- 10 мм.

Для элементов статически неопределимых конструкций значение эксцентриситета продольной силы относительно центра тяжести приведенного сечения e_0 принимают равным значению эксцентриситета, полученного из статического расчета, но не менее e_a .

Для элементов статически определимых конструкций эксцентриситет e_0 принимают равным сумме эксцентриситетов – из статического расчета конструкций и случайного.

Расчет ФБТК необходимо выполнять с применением математической модели статической работы материала, полученной путем испытания образцов.

Требования по трещиностойкости ФБТК назначаются исходя из условий эксплуатации сооружений и типа применяемого армирования.

К трещиностойкости ФБТК предъявляются требования соответствующих категорий в зависимости от условий, в которых они работают, и от типа армирования:

- первая категория не допускает образование трещин;
- вторая категория допускает ограниченное по ширине, непродолжительное и продолжительное раскрытие трещин.

Категории требований к трещиностойкости ФБТК в зависимости от условий их работы и вида арматуры, а также величины предель-

но допустимой ширины раскрытия трещин, которые не должны превышать значений, указанных в основных (руководящих) нормативных документах на проектируемое сооружение.

При использовании ФБ на основе ПФ, не подверженной коррозии, в зависимости от назначения конструкции и условий ее эксплуатации в обоснованных случаях допускается увеличивать значение предельно допустимой ширины раскрытия трещины, но не более величин $l_f/20$ и 3 мм.

4.8. Показатели качества ФБ и их применение при проектировании

При проектировании конструкций из ФБ проектировщик должен указать класс ФБ по прочности на сжатие в соответствии с СП 120.13330 и СП 122.13330, класс по остаточной прочности на растяжение при изгибе, вид материала фибры, характеристики СФБ и ПФБ, а также марки по водонепроницаемости и морозостойкости в соответствии с СП 120.13330 и СП 122.13330, например: СФБ В40 В_F3,0b W8 F150 или ПФБ В40 В_F3,0b W8 F150.

Для ФБ конструкций и конструкций с комбинированным армированием ФЖБ, рассматриваемых в настоящем стандарте, следует предусматривать ФБ следующих классов и марок:

– классов по прочности на сжатие: В20; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60;

– классов по остаточной прочности на растяжение при изгибе: В_F0.5 (а, b, с, d, e) – В_F8 (а, b, с, d, e);

– марок по морозостойкости: F100; F150; F200; F300; F400; F500; F600;

– марок по водонепроницаемости: W6; W8; W10; W12; W14; W16.

Значение нормируемой отпускной прочности ФБ в элементах сборных конструкций тоннелей и подземных сооружений следует рассчитывать с учетом технологии их изготовления, условий их транспортировки, хранения и монтажа, возможности дальнейшего нарастания прочности ФБ в конструкциях (в том числе с учетом температуры наружного воздуха) и сроков их загрузки расчетной нагрузкой.

Значение нормируемой отпускной прочности ФБ на сжатие следует принимать не менее 50 % от класса ФБ по прочности на сжатие.

Нормируемая отпускная прочность ФБ должна указываться в рабочей документации или при заказе изделий.

Поставка изделий потребителю должна производиться после достижения бетоном требуемой отпускной прочности.

Изготовитель должен гарантировать, что ФБ изделий, поставляемых с отпускной прочностью ФБ ниже прочности, соответствующей его классу по прочности, достигнет требуемой прочности в проектном возрасте, которая определяется по результатам испытания контрольных образцов, изготовленных из ФБ смеси рабочего состава и хранившихся в нормальных условиях при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не менее 95 %.

Марку ФБ по морозостойкости назначают в зависимости от требований, предъявляемых к конструкциям, режима их эксплуатации и условий окружающей среды.

Марку ФБ по водонепроницаемости назначают в зависимости от требований, предъявляемых к конструкциям, режима их эксплуатации и условий окружающей среды.

Класс ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе – показатель качества ФБ, обозначаемый числом и строчной латинской буквой. Число в обозначении класса характеризует гарантированную прочность ФБ на растяжение при изгибе $R_{F_{0,5,n}}$ с обеспеченностью 0,95, соответствующую продольной деформации надреза образца-балки $CMOD = 0,5$ мм при испытаниях на изгиб; латинская буква характеризует отношение гарантированных прочностей ФБ на растяжение при изгибе $R_{F_{2,5,n}}$ и $R_{F_{0,5,n}}$ при $CMOD = 2,5$ мм и $CMOD = 0,5$ мм соответственно (рис. 4.12).

Класс ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе назначается в результате испытаний образцов-балок с надрезом по EN 14651 для сборного и монолитного бетона или балок без надреза по EN 14488-3 для ФНБ.

Расчет по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели.

При расчете по прочности усилия и деформации в сечении, нормальном к продольной оси элемента, определяют на основе нелинейной деформационной модели, использующей уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в сечении элемента, а также следующие положения:

– распределение относительных деформаций ФБ и арматуры по высоте сечения элемента принимается по линейному закону (гипотеза плоских сечений);

– связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями бетона и арматуры принимают в виде диаграмм состояния (деформирования) ФБ и арматуры (СП 52-101).

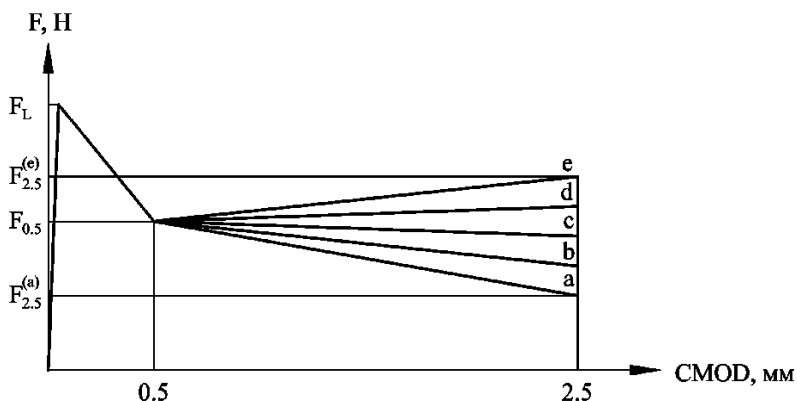


Рис. 4.12. Приведенный график «F – CMOD» для назначения класса ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе:

- a – при $0,5 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 0,7$; b – при $0,7 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 0,9$;
 c – при $0,9 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 1,1$; d – при $1,1 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 1,3$;
 e – при $1,3 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n}$.

Переход от эпюры напряжений в ФБ к обобщенным внутренним усилиям определяют с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Для этого нормальное сечение условно разделяют на малые участки: при косом внецентренном сжатии (растяжении) и косом изгибе – по высоте и ширине сечения; при внецентренном сжатии (растяжении) и изгибе в плоскости оси симметрии поперечного сечения элемента – только по высоте сечения. Напряжения в пределах малых участков принимают равномерно распределенными (усредненными).

При расчете элементов с использованием деформационной модели:

– значения сжимающей продольной силы, а также сжимающих напряжений и деформаций укорочения ФБ и арматуры принимают со знаком «минус»;

– значения растягивающей продольной силы, а также растягивающих напряжений и деформаций удлинения ФБ и арматуры принимают со знаком «плюс».

Знаки координат центров тяжести арматурных стержней и выделенных участков ФБ, а также точки приложения продольной силы принимают в соответствии с назначенной системой координат ХОУ. В общем случае начало координат этой системы (точка «О» на рис. 4.12) располагают в произвольном месте в пределах поперечного сечения элемента.

Расчет по прочности элементов ФБТК при действии поперечных сил.

Элементы без продольной и поперечной стержневой арматуры.

При использовании ФБ с упрочняющимся при растяжении характером работы (при проведении соответствующих испытаний на осевое растяжение по формуле 4.5), в элементах без продольной и поперечной арматуры должна быть выполнена проверка по главным растягивающим напряжениям σ_1 (определяемым при оценке напряженно-деформированного состояния конструкции).

$$V_{Rd,F} = \left\langle \frac{0.18}{\gamma_c} k \left[100 \rho_1 \left(1 + 7,5 \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} + 0,15 \sigma_{cp} \right\rangle b_w d. \quad (4.5)$$

Расчет по прочности элементов ФБТК на местное сжатие.

Расчет фибробетонных элементов на местное сжатие производят в соответствии с положениями СП 63.13330. Для элементов из фибробетона на основе СФ допускается производить расчет на местное сжатие по СП 52-104.

Расчет по прочности элементов ФБТК на продавливание.

Расчет фибробетонных элементов на продавливание производят в соответствии с положениями СП 63.13330. Для элементов из фибробетона на основе СФ допускается производить расчет на продавливание по СП 52-104.

Расчет элементов ФБТК по предельным состояниям второй группы.

При расчете фибробетонных конструкций по второй группе предельных состояний критериями достижения предельного состояния являются:

- предельные напряжения в фибробетоне;
- предельные значения раскрытия трещин по ширине;
- предельные деформации.

Расчет элементов ФБТК по предельным напряжениям.

Для предотвращения интенсивного трещинообразования и неупругих деформаций в ФБ, напряжения следует ограничивать предельно допустимыми значениями.

В элементах несущих конструкций из ФБ, имеющих разупрочняющийся характер работы при растяжении после образования трещин, данную проверку по растягивающим напряжениям по второй группе предельных состояний допускается не производить.

Расчет элементов ФБТК по раскрытию трещин.

Для обеспечения возможности выполнения требований по ограничению ширины раскрытия трещин в ФБ конструкциях без стержневой арматуры должны выполняться следующие условия:

– нормальные сжимающие напряжения, действующие в сечении, обуславливают величину раскрытия трещины при соответствующих растягивающих напряжениях в сечении;

– система является внешне статически неопределимой, что способствует перераспределению внутренних усилий в ней при образовании трещин;

– система является внутренне статически неопределимой (например, за счет стержневой стальной арматуры) и допускает перераспределение напряжений в поперечном сечении, которое приводит к дальнейшему трещинообразованию в смежных сечениях.

Во всех других случаях для обеспечения требований по допустимой ширине раскрытия трещин требуется применение стержневого армирования.

Предельно допустимое значение ширины раскрытия трещины назначается в соответствии с СП 52-101 и СП 52-104. Для обделок тоннелей, в которых образование трещин допускается, ширина раскрытия трещин для СФБ конструкций не должна превышать 0,2 мм.

При применении фибробетонов на основе ПФ, не подверженной коррозии допускается увеличивать значение предельной ширины раскрытия трещин при соответствующем обосновании.

При расчете элементов ФБТК по раскрытию трещин используется методика нелинейной деформационной модели. При этом связь между напряжениями и деформациями в ФБ сечении учитывается нормативной диаграммой состояния «G-s».

Расчет элементов ФБТК по деформациям следует производить в соответствии с положениями СП 52-101 и СП 52-104.

Требования к материалам.

Материалы для конструкций транспортных тоннелей (обделок, притоннельных подземных сооружений, порталов, припортальных подпорных стен, рампы, внутренних строительных конструкций) должны отвечать требованиям прочности, огнестойкости, долговечности, устойчивости к химической агрессивности грунтовых вод и воздействию микроорганизмов, не выделять токсичных соединений в условиях строительства и эксплуатации тоннеля при нормальных и аварийных температурных режимах и иметь установленные в законодательном порядке обязательные сертификаты.

Выбор материалов, проектирование состава и приготовление фибробетонной смеси должны осуществляться в соответствии с рекомендациями и положениями:

- СНИП 82-02 – при приготовлении бетонных смесей;
- ВСН 48 – при возведении монолитных обделок;
- СНиП 3.09 – при производстве сборных изделий и элементов конструкций.

Тип и марка цемента должны выбираться с учетом:

– технологии производства работ (в том числе времени от момента приготовления до укладки в конструкцию, способа укладки (пневмонанесение с затворением сухой смеси на выходе из сопла, насосом, укладка бадьей));

– вида конструкций (армированная полимерной конструкционной фиброй, обычной стальной или коррозионностойкой фиброй, металлической стержневой или неметаллической);

- экзотермии в процессе твердения;
- условий твердения (в частности тепловой обработки);
- размеров конструкции;
- климатических характеристик;
- назначения сооружения;
- агрессивности среды эксплуатации;
- щелочно-реакционной способности заполнителя.

Для набрызгбетонов рекомендуется использовать цементы ПЦ 500 Д0 с удельной поверхностью не менее 3000 см²/г для обеспечения требуемой кинетики набора прочности, в том числе и в раннем возрасте.

Для приготовления бетонных смесей для сборных и монолитных конструкций следует применять бездобавочный портландцемент и портландцемент с минеральными добавками по ГОСТ 31108,

ГОСТ 10178, ГОСТ 30151, ГОСТ 969, ГОСТ 22266 характеристики, которых определяют по ГОСТ 310.1-310.4.

При агрессивных воздействиях на бетонные и железобетонные конструкции в процессе эксплуатации, цемент выбирают в соответствии с СП 28.13330 (СНиП 2.03).

Заполнители для бетонов следует применять фракционированными и чистыми, без примесей. Запрещается применять природную песчано-гравийную смесь без фракционирования.

При выборе заполнителей предпочтение следует отдавать материалам из местного сырья.

В качестве плотного мелкого заполнителя используется песок, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736.

В качестве плотного крупного заполнителя применяется щебень и гравий по ГОСТ 8267. Морозостойкость крупных заполнителей должна быть не ниже нормированной марки бетона по морозостойкости.

Реакционную способность заполнителей определяют по ГОСТ 8735.

Марки по прочности крупных плотных заполнителей, определяемые по дробимости при сжатии в цилиндре, должны быть выше класса бетона по прочности на сжатие не менее чем в 2 раза для В15 и выше.

Максимальный размер зерен крупного заполнителя для монолитных и сборных ФБ конструкций 20 мм, для ФНБ следует ограничить 15 мм.

Зерен наибольшего размера лещадной и игловатой форм должно быть не более 15 % по массе.

Содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне из осадочных пород не должно превышать следующих значений % по массе:

1 % – для бетона конструкций, эксплуатируемых в зоне переменного уровня воды;

2 % – для бетона монолитных конструкций, расположенных вне уровня зоны переменного уровня воды.

Дополнительное обогащение заполнителей (т. е. рассев на фракции щебня с отбором фракций менее 5 мм и отсева от песка фракций крупнее 5 мм) может быть организовано с промывкой или без нее.

Для повышения прочностных характеристик фибробетона, увеличения сил сцепления фибры с бетоном, рекомендуется использовать микро- и ультрадисперсные минеральные добавки в виде порошка:

– микрокремнезем конденсированный по ТУ 5743-048-02495332 или водной суспензии;

– кварц молотый пылевидный по ГОСТ 9077.

Для снижения расхода цемента и заполнителей при приготовлении бетонных смесей рекомендуется использовать золы-уносы, шлаки и золошлаковые смеси ТЭС, отвечающие требованиям ГОСТ 25592, ГОСТ 25818 и ГОСТ 26644.

В качестве стабилизаторов бетонной смеси (высокоподвижных и укладываемых пневмонабрызгом), а также добавок, снижающих температурно-влажностную усадку на стадии схватывания и твердения, рекомендуется применять микрофибру МПФ.

Бетонные смеси марок по удобоукладываемости ПЗ-П5 для производства сборных железобетонных конструкций и изделий, и марок по удобоукладываемости П4 и П5 для монолитных и сборно-монолитных конструкций должны изготавливаться с обязательным применением пластифицирующих добавок.

4.9. Композиционная стержневая арматура

Неметаллическая композиционная арматура (АНК) может применяться для армирования конструкций транспортных тоннелей при соблюдении требований и положений [44], в соответствии с которыми выбирается материал волокна и матрицы, номинальные размеры (диаметр, расчетный диаметр, расчетная площадь поперечного сечения), нормативное значение прочности на растяжение, модуль упругости и предельная относительная деформация растяжению (вдоль стержня).

Толщину защитного слоя следует назначать из условий совместной работы АНК и бетона в соответствии с требованиями СП 63.13330.

В соответствии с ГОСТ 31384 и СП 28.13330 к конструкциям, армированным АНК, с позиции коррозионного поведения не предъявляются требования по ширине раскрытия трещин. Предельно допустимую ширину раскрытия трещин следует устанавливать в соответствии с СП 63.13330, исходя из конструктивных требований, эксплуатационной пригодности, эстетических соображений, нали-

чия требований к проницаемости конструкций, а также в зависимости от длительности действия нагрузки.

Предельные прогибы и перемещения бетонных конструкций с армированием АНК регламентируются общими требованиями согласно СП 20.13330, исходя из конструктивных, технологических, физиологических и эстетико-психологических факторов.

Предельная длительная рабочая температура АНК в объеме бетона составляет 200 °С.

4.10. Общие правила проектирования монолитных, сборных и набрызгбетонных конструкций из фибробетона. Конструктивные требования

Для оценки эффективности и выбора рационального типа фибры целесообразно сравнить расчеты ФБ конструкций по предельным состояниям. Расчеты необходимо выполнять с применением математической модели работы материала, полученной экспериментально.

При выборе материала и типа фибры необходимо также учитывать требования по огнестойкости и коррозионной стойкости конструкций.

Определение процента армирования и выбор рабочего варианта армирования конструкции.

Определение требуемого армирования конструкций производится с помощью расчетов конструкции по предельным состояниям первой и второй групп.

При необходимости армирования конструкции стержневой арматурой, армирование следует подбирать, руководствуясь положениями СНиП 52-01, СП 52-101.

Минимальные значения коэффициента фибрового армирования при проектировании ФБ конструкций следует принимать, исходя из условия:

$$R_{fbt,n} \geq 1,5R_{bt}. \quad (4.6)$$

Размеры, расстояния между стержнями, защитный слой, конструктивное армирование.

При применении стержневой арматуры размеры, расстояния между стержнями и величина защитных слоев назначаются в соответствии со СНиП 52-01, СП 52-101.

Шаг рабочей арматуры назначается из условий нормальной укладки ФБ и возможности его уплотнения, при этом минимальное расстояние в свету между рабочими стержнями арматуры $s_{sm}i_n$ должно быть не менее длины фибры lf , увеличенной на 10 %:

$$S_{s,m}in = 1,1lf. \quad (4.7)$$

При необходимости следует проводить пробное (тестовое) формирование или укладку бетона для определения минимального расстояния в свету между стержнями.

Для армирования рекомендуется использовать стержни диаметрами не более 32 мм. При применении арматуры диаметром более 40 мм следует производить дополнительное обоснование конструктивных параметров армирования.

Величина защитного слоя стержневой арматуры назначается в соответствии с СП 52-101.

При проектировании элементов конструкции с проемами (нишами) необходимо предусматривать дополнительное «оконтуривающее» стержневое армирование. Площадь стержневой арматуры в этом случае определяется по формуле:

$$A_{s,i} = A_{c,i}R_{ft} / R_s \geq 0,005A_{c,i}, \quad (4.8)$$

где $A_{s,i}$, $A_{c,i}$ – суммарная площадь сечения «оконтуривающей» арматуры и площадь поперечного сечения бетона, соответственно, в рассматриваемом направлении.

4.11. Рабочие и деформационные швы

Располагать швы бетонирования следует с учетом технологии возведения сооружения и его конструктивных особенностей. При этом должна быть обеспечена необходимая прочность контакта поверхностей бетона в шве бетонирования, а также прочность конструкции с учетом наличия швов бетонирования.

Участки (захватки) бетонирования должны предусматриваться проектной документацией с учетом напряженного состояния конструкции, способа устройства шва.

Определение места расположения, конструктивных параметров и способа армирования зон передачи нагрузки.

Зоны передачи концентрированных усилий должны быть проверены по растягивающим напряжениям, образующимся за счет сжатия, и по сжимающим напряжениям непосредственно на участке нагружения.

Дополнительная стержневая арматура не требуется, если конструктивно обеспечена передача нагрузки на элемент не ближе 10 см к его грани и расчетом установлена достаточность прочности ФБ по главным, сжимающим и растягивающим напряжениям.

Требования к качеству поверхности конструкции.

Фибра в бетоне после расформовки, разопалубливания и после набрызгбетонирования может выходить на поверхность, при этом существует вероятность коррозии стальной фибры на поверхности без ее распространения вглубь ФБ с нарушением эстетики готовой конструкции, а также вероятность травмирования людей фиброй.

Обеспечение долговечности ФБТК.

Для обеспечения долговечности ФБТК следует предусматривать мероприятия первичной и вторичной защиты, аналогичные мероприятиям защиты бетонных и железобетонных конструкций, назначаемым в соответствии с СП 28.13330 и заключающимся в:

- применении бетонов, стойких к воздействию агрессивной среды;
- выборе и применении арматуры, соответствующей по коррозионным характеристикам условиям эксплуатации;
- защите от коррозии закладных деталей и связей на стадии изготовления и монтажа сборных железобетонных конструкций;
- соблюдении дополнительных расчетных и конструктивных требований при проектировании ФБ и ФЖБ конструкций, в том числе обеспечении проектной толщины защитного слоя бетона и ограничение ширины раскрытия трещин.

К мерам вторичной защиты для конструкций транспортных тоннелей относится защита поверхности ФБ и ФЖБ конструкций специальными покрытиями, оклеечной изоляцией, гидрофобизирующими составами проникающего действия или препаратами – биоцидами.

ГОСТ 31384 используется для правильного назначения марок бетона по морозостойкости, водонепроницаемости, вида цемента, которые следует определять по СП 28.13330, а также материала фибровой арматуры по показателям коррозионной стойкости.

Для несущих ФБ конструкций должна применяться фибра из материалов, модуль упругости которых изменяется не более чем на 10 % в течение срока службы конструкции и/или при воздействии температуры в диапазоне от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$ и влажности до 100 %. Материал фибры должен быть стойким в щелочной среде портландцемента и средах эксплуатации.

Для тоннельных конструкций первого (повышенного) уровня ответственности по ГОСТ Р 54257, срок эксплуатации которых превышает 100 лет, оценка степени агрессивности, в соответствии с п. 4.1 СП.28.13330, повышается на один уровень.

Требования к ФБ конструкциям должны назначаться, исходя из необходимости обеспечения проектного срока эксплуатации сооружения.

Долговечность ФБ и ФЖБ определяется составом и характеристиками бетона-матрицы с проведением соответствующих ГОСТ 27677, ГОСТ 10060.0, ГОСТ 12730.3, ГОСТ 12730.5 испытаний на конкретных материалах на стадии подбора составов.

Требования по обеспечению коррозионной стойкости бетона-матрицы для каждого условия эксплуатации должны включать в себя:

- разрешенные виды и марки (классы) составляющих бетона;
- минимально необходимое содержание цемента в бетоне;
- минимальный класс бетона по прочности на сжатие;
- минимальную допускаемую марку бетона по водонепроницаемости и/или максимальный допускаемый коэффициент диффузии хлоридов или углекислого газа;
- минимальный объем вовлеченного воздуха или газа (для бетонов с требованиями по морозостойкости).

Подбор состава бетона-матрицы с учетом воздействия среды эксплуатации рекомендуется выполнять в специализированных лабораториях научно-исследовательских институтов, университетов, других научно-исследовательских организаций в случаях, если:

- заданные проектом сроки эксплуатации сооружения существенно превышают 50 лет, а также если сооружение имеет повышенный уровень ответственности по ГОСТ Р 54257;
- среда эксплуатации агрессивна, но характер агрессивности не ясен;
- возможно повышение агрессивности среды в период эксплуатации сооружения;

- планируется массовое возведение однотипных конструкций;
- для приготовления бетона используются новые материалы (цементы, заполнители, наполнители, добавки и т. п.).

Обеспечение стойкости материала конструкции к воздействию блуждающих токов.

Для обеспечения стойкости ФЖБ конструкций к воздействию блуждающих токов необходимо предусматривать комплекс мероприятий в соответствии с ГОСТ 9.602 и СП 28.13330 (СНиП 2.03) с учетом типа армирования конструкции.

Конструкции, армированные неметаллической фиброй (полимерной, базальтовой, стеклянной), по воздействию на них блуждающих токов следует рассматривать как неармированный бетон, не подверженный коррозии от блуждающих токов.

Общие требования пожарной безопасности к строительным конструкциям транспортных тоннелей.

Конструкции подземных сооружений и помещений метрополитена, автодорожных и железнодорожных тоннелей в соответствии со СП 122.13330 и СП 32-105 (СНиП 32-02) должны соответствовать классу пожарной опасности К0.

Конструкции подземных сооружений метрополитена должны иметь пределы огнестойкости, в соответствии со СНиП 32-02 (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Предел огнестойкости обделок и основных конструкций метрополитена

Наименование конструкции	Предел огнестойкости, не менее
Обделка тоннелей, платформенных и среднего залов станций и тоннелей, пристанционных и притоннельных сооружений, пилоны и колонны станций	R90
Обделка эскалаторных тоннелей и вестибюлей станции	R60

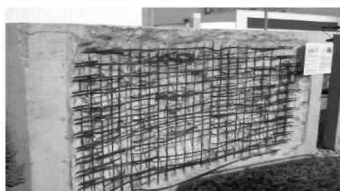
Пределы огнестойкости строительных конструкций автодорожных и железнодорожных тоннелей необходимо принимать по СП 122.13330; выборка по основным конструкциям дана в табл. 4.2.

Предел огнестойкости обделок и основных конструкций
автомобильных и железнодорожных тоннелей

Наименование строительных конструкций	Тоннели не городские	Тоннели городские	Тоннели подводные
Обделки транспортных тоннелей, внутренние несущие конструкции тоннелей и притоннельных сооружений (стены, колонны и перекрытия)	R90	R150	R180
Обделки притоннельных сооружений, порталов и штолен	R90	R90	R90

4.12. Хрупкое разрушение бетона при огневом воздействии

Для снижения вероятности взрывообразного хрупкого разрушения наружного слоя бетона при пожаре рекомендуется его дисперсное армирование (рис. 4.13–4.14).



Железобетон
Глубина отколов – 340 мм



Железобетон с 2 кг/м³ ПП фибры
Глубина отколов – 15 мм

Рис. 4.13. Результаты испытания железобетонных конструкций для городского тоннеля в Лейпциге (RABT f кривая огня) со стержневым армированием и при дополнительном введении полипропиленовой (ПП) микрофибры [42]

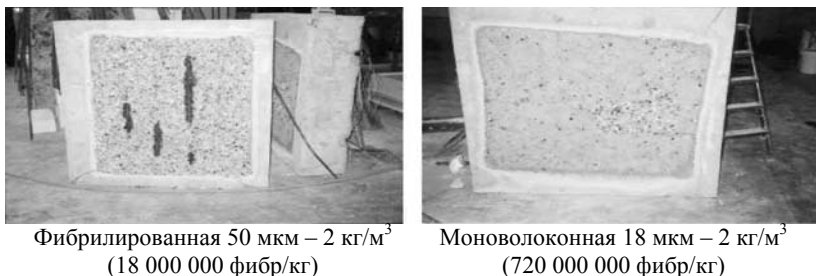


Рис. 4.14. Результаты сравнительных огневых испытаний железобетонных плит при температуре 1300 °С с разными видами микрофибр (по данным исследований TNO Delft/NL, Ян. 1999) [42]

Фибра, уменьшающая откалывание (хрупкое разрушение) бетона при пожаре, должна отвечать следующим требованиям:

- температура плавления ниже 170 °С;
- температура испарения ниже 400 °С;
- высокое количество волокон в единице массы не менее 1 000 000 фибр/кг;
- расход 1–3 кг/м³ в зависимости от количества волокон в единице массы;
- малотоксичные газы при испарении волокон.

4.13. Требования огнестойкости

Огнестойкость конструкций должна назначаться в соответствии с требованиями СП 32-105 и СП 122.13330.

Для обеспечения требуемой огнестойкости должны быть соблюдены соответствующие конструктивные требования, касающиеся минимальных размеров поперечного сечения элементов. Если в конструкции кроме фибрового армирования применяется армирование стержнями, то также должны быть соблюдены требования по минимальному расстоянию от граней конструкции до арматуры (рис. 4.15).

В соответствии с СТО 36554501-006 для обеспечения огнестойкости и ремонтпригодности железобетонной конструкции после пожара необходимо, чтобы разрушенный слой бетона, нагретый до 450 °С, после пожара не оказывал влияния на дальнейшую эксплуатацию конструкции. Это может обеспечить расстояние от оси арматуры до нагреваемой грани. При проектировании огнестойкой отделки при

стандартном пожаре длительностью 90 минут расстояние от оси арматуры до нагреваемой грани бетона должно быть не менее 35 мм, при 120 мин – 45 мм, при 150 мин – 55 мм, при 180 мин – 60 мм.

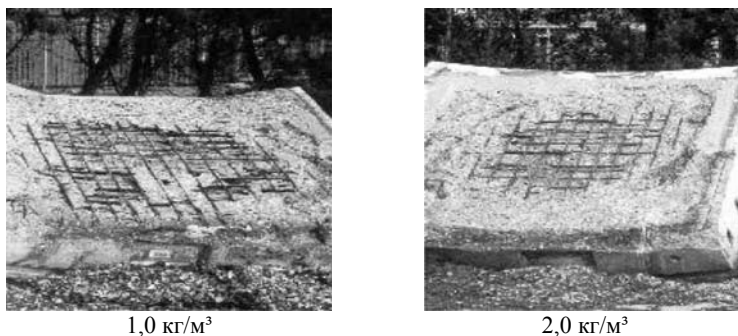


Рис. 4.15. Результаты исследования влияние содержания полипропиленовых волокон (микрофибр) на огнестойкость блоков тоннельной обделки, испытанных при огневом воздействии 1300 °С в течение 120 минут и предварительной нагрузке на блок равной 6,50 МПа (данные TNO Center for fire research, Deift/NL, April 2000) [42]

Конструирование элементов должно обеспечить нагрев ненапрягаемой арматуры во время пожара не более 500 °С, предварительно напряженной арматуры – не более 100 °С.

Если фактические прогиб и раскрытие трещин после пожара превышают допустимые значения, но не препятствуют нормальной эксплуатации здания и сооружения, допускается не предусматривать усиление конструкции либо снижение нагрузки. При этом рекомендуется предусматривать мероприятия по устранению (компенсации) сверхнормативных прогибов и лечению трещин.

Расчет огнестойкости и огнесохранности рекомендуется производить, руководствуясь СТО 36554501-006 по приведенному сечению, когда сечение элемента разбивается на малые характерные участки, нагретые до различных температур, и каждый малый участок приводится к ненагретому бетону с учетом соответствующих понижающих характеристик прочности бетона.

Выбор материалов для приготовления бетонов с требуемой огнестойкостью следует производить, руководствуясь Правилами по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций – СТО 36554501-006.

Определение прочности на растяжение после трещинообразования в фибробетонных элементах при температурном воздействии.

Проверку класса огнестойкости следует выполнять по остаточной прочности ФБ на растяжение, уменьшающейся пропорционально температуре воздействия при огневом воздействии в области температуры 300 °С.

Огнестойкость конструкций повышается при введении конструкционной полипропиленовой фибры и не снижается при введении в бетонную смесь стальной фибры в количестве до 1 % по объему, поэтому допускается проверку класса огнестойкости выполнять по упрощенной схеме, заключающейся в определении величины нарушенного слоя ФБ от длительности воздействия, при огневом воздействии, не выходящем за принятую область (до 300 °С).

При введении фибры в количестве более 1 % по объему необходимо проведение соответствующих испытаний, внедрение полипропиленовой микрофибры (диаметром 3–32 мкм) в количестве 1–3 кг/м³ или применение огнезащитных покрытий, аналогичных защитным покрытиям для железобетонных конструкций с учетом положений СП 28.13330.

Подбор состава ФБ смеси производят с целью получения ФБ, отвечающего техническим показателям. При отсутствии требований в проекте, изготовитель бетонной смеси должен выбирать вид и класс исходных материалов с подтвержденной пригодностью для эксплуатации в установленных условиях окружающей среды.

За основу при подборе состава ФБ следует принимать определяющий для данного вида бетона и назначения конструкции показатель бетона. При этом должны быть обеспечены и другие установленные проектом показатели качества бетона.

Проектирование и подбор состава бетонной смеси по требуемой прочности бетона следует производить, руководствуясь ГОСТ 27006, ГОСТ 26633 и СНиП 82-02, с необходимой корректировкой состава по результатам испытаний ФБ смеси и ФБ.

Подбор состава бетонной смеси следует производить на основе характеристик материалов, используемых для ее приготовления, включающих портландцемент, заполнители, воду, эффективные добавки (модификаторы) соответствующих ГОСТ 30515, ГОСТ 23732, ГОСТ 8267, ГОСТ 8736, ГОСТ 24211 и конструкционной стальной или полимерной фибры.

Материалы, применяемые при изготовлении ФБ смеси, должны удовлетворять требованиям действующих ГОСТ и других нормативных документов.

При подборе состава бетонной смеси должны быть обеспечены требуемые показатели качества (удобоукладываемость, сохраняемость, нерасслаиваемость, воздухо содержание и другие показатели).

Свойства подобранной ФБ смеси должны соответствовать технологии производства бетонных работ, включающей сроки и условия твердения бетона, способы, режимы приготовления и транспортирования бетонной смеси и другие особенности технологического процесса.

Фактические характеристики подобранных составов ФБ: прочность на сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона, морозостойкость и водонепроницаемость – следует определять, руководствуясь ГОСТ 10180, ГОСТ Р 53231, ГОСТ Р ISO 5725, ГОСТ 23452, ГОСТ 10060.0, ГОСТ 10060.1, ГОСТ 10060.2, ГОСТ 12730.3, ГОСТ 12730.5.

Состав ФНБ «сухого» способа нанесения следует подбирать, руководствуясь ВСН 126 с учетом того, что расход фибры следует принять на 15 % больше для стальной фибры и на 7 % для полимерной с учетом возможного «отскока» в процессе нанесения с обязательной корректировкой по результатам испытаний опытных образцов.

4.14. Приготовление ФБ смесей для монолитных, сборных и набрызгбетонных («мокрого» способа нанесения) конструкций

Технология приготовления смесей должна удовлетворять требованиям нормативно-технических документов, в том числе: ОСТ 7473, ГОСТ 10181, ГОСТ 25192, ГОСТ 26633.

Применяемые бетоносмесители и режимы перемешивания ФБ смеси различных марок по удобоукладываемости должны обеспечить получение однородной смеси с коэффициентом вариации прочности внутри замеса не более 9 %.

Приготавливать фибробетонную смесь рекомендуется в смесителе бетонного узла (завода), допускается при необходимости введение фибры непосредственно в автобетоносмеситель с бетонной смесью. Чтобы снизить нагрузку на электрический привод бетоносмесителей, их загрузку фибробетонной смесью нужно уменьшить на 15–20 % по сравнению с паспортными данными смесителей.

Технологические процессы изготовления однородной ФБ смеси зависят от вида и количества фибровой арматуры (фибры), ее геометрических параметров (особенно отношения длины к диаметру), объема цементного теста в составе бетона-матрицы, заданных параметров удобоукладываемости, максимального размера крупного заполнителя, последовательности ввода компонентов, способа подачи фибры в смеситель, типа используемого смесителя и режима перемешивания ФБ смеси.

Вид фибры и ее параметры определяют технологические ограничения, выполнение которых помогает исключить или свести к минимуму неоднородности распределения дисперсной арматуры по объему матрицы (образование «ежей»).

Равномерность распределения фибр в объеме замеса и минимизация неоднородностей композита (комки и «ежи») достигаются выполнением следующих мероприятий:

- применение заполнителей, имеющих непрерывную гранулометрию, для приготовления бетонной смеси;
- увеличение подвижности смеси путем введения пластифицирующих добавок 1-й группы эффективности (ГОСТ 24211);
- равномерная подача фибры в смеситель с помощью специальных устройств.

Количество фибровой арматуры следует определять опытным путем, исходя из проектной марки фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_f .

Дозирование компонентов бетонной смеси осуществляют тарированными дозаторами. Дозировка сыпучих материалов производится только по массе, жидких составляющих – по массе или объему. Погрешность дозирования не должна превышать 1 % для цемента, воды и жидких добавок, 2 % – для заполнителей и фибры. Для всех материалов, за исключением фибры, рекомендуется применять серийно производимые дозаторы.

В случае использования биг-бэгов для более крупных смесительных установок скорость введения может достигать 150–200 кг/мин.

При небольших объемах и на время внедрения производства ФБ смесей допускается ручное введение СФ и ПФ, устойчивых к «комкованию» непосредственно из коробок (мешков) заводской упаковки при строгом соблюдении правил техники безопасности.

Приготовление ФБ смеси рекомендуется осуществлять в смесителях принудительного действия. При этом следует руководство-

ваться рекомендациями изготовителя фибры в части режимов и порядка ее приготовления.

ФБ смеси марок ПЗ и выше допускается приготавливать в стационарных гравитационных смесителях и автобетоносмесителях при времени перемешивания не менее 5 минут.

Возможны два основных способа приготовления фибробетонной смеси с СФ или ПФ:

1) равномерное введение фибровой арматуры в готовую бетонную смесь (матрицу), приготавливаемую по традиционной технологии, дополнительное перемешивание с фиброй в течение 3–5 минут и выгрузка;

2) приготовление сухой смеси (заполнители, вяжущее, фибра), подача воды и добавок в работающий смеситель, смешивание в течение 3–5 минут и выгрузка.

Второй способ рекомендуется использовать для бетонов с крупным заполнителем.

До начала массового производства ФБ смесей следует установить максимально допустимое время перемешивания бетонной смеси с конкретным видом фибры, т. к. увеличение продолжительности смешивания, как правило, способствует более интенсивному образованию «ежей» из фибр.

На стройплощадке время перемешивания бетонной смеси (матрицы) в автобетоносмесителе после введения в нее фибры рекомендуется ограничить 15–20 минутами.

При приготовлении ФБ смеси в зимнее время исходная бетонная смесь должна иметь положительную температуру и приготавливаться на подогретых заполнителях и воде (не выше 70 °С). Если смесь готовится на горячей воде или холодных заполнителях, в последних не допускаются включения льда и снега, а также смерзшиеся комья и наледь.

4.15. Транспортирование ФБ смеси

В условиях производства сборного железобетона транспортирование ФБ смесей к посту формирования изделий следует производить при помощи средств, обеспечивающих сохранение в заданных пределах технологических характеристик смесей (удобоукладываемость, расслаиваемость).

Доставка смеси может осуществляться ленточными конвейерами; самоходными бункерами, бадьями, бетоноукладчиками. При этом должны применяться устройства, исключающие зависание смесей в разгрузочных отверстиях бункеров. Не рекомендуется осуществлять перегрузку смесей из одного транспортного средства в другое во избежание появления расслоения бетонной матрицы и фибры.

Транспортирование бетонной смеси в монолитном строительстве необходимо осуществлять с соблюдением требований СНиП 3.03.

В случае приготовления фибробетонной смеси на бетоно-смесительных узлах транспортирование рекомендуется производить автобетоносмесителями. После каждого рейса барабаны должны промываться водой, при этом следует предусмотреть мероприятия по извлечению фибры из стоков, имея в виду, что стальная фибра опускается вниз, а полимерная всплывает.

Удобоукладываемость бетонной смеси назначают, исходя из наличия в бетонируемой конструкции стержневой арматуры (шаг и диаметр), времени транспортирования смеси к месту укладки, способа подачи в опалубку (бетононасос, пневмоукладчик, бадья и проч.), водоцементного отношения, вида цемента, вида и количества химических добавок, температурно-влажностных условий.

Допускаемая минимальная величина подвижности смеси при транспортировании автобетоносмесителями должна составлять:

а) ОК = 9–10 см (марки П2–П3) по ГОСТ 7473 – при укладке с помощью бункера или бадьи;

б) ОК = 15–22 см (марки П4–П5) в зависимости от дальности подачи – при укладке с помощью бетононасоса или установки для набрызгбетонирования.

В случае введения фибры в автобетоносмеситель необходимо учитывать обязательную потерю подвижности бетонной смеси при добавлении в нее фибры. Величина потери подвижности для фибры (стальной или полимерной), выпускаемой в соответствии с Европейскими стандартами EN 14845, должна быть указана в сертификате.

Состав бетона-матрицы следует подбирать, исходя из необходимости повышения подвижности бетонной смеси на величину ее потери при введении фибры, что определяет строительная лаборатория на стадии подбора состава и приготовления опытных производственных замесов.

Допускается восстановление подвижности смеси после добавления фибры путем введения в миксер пластифицирующей добавки,

аналогичной вводимой на БСУ, что должно выполняться под контролем строительной лаборатории.

Выгрузку фибробетонной смеси из автобетоносмесителя производят равномерно небольшими порциями передвигая лотка по всей бетонируемой поверхности или в приемные бункеры бетононасосов, или разгружают в бетонораздаточный бункер.

Для транспортирования смеси с фибрами к месту укладки следует пользоваться открытыми емкостями, разгружаемыми путем переворачивания, или бункерами с нулевым уклоном стенок, оборудованными устройствами для вибропобуждения смеси.

Время от начала затворения смеси до ее укладки и уплотнения не должно превышать 1,5–2 часа для монолитных и набрызгбетонных конструкций и 45 минут для сборных.

ФБ для монолитных конструкций (при расположении тоннелей на расстоянии от БСУ, превышающем доставку бетонной смеси в течение 1,5 часа) рекомендуется приготавливать из сухих бетонных смесей заводского изготовления при введении требуемого количества воды (или воды с добавками) непосредственно на объекте. После перемешивания смеси в автобетоносмесителе равномерно вводится фибра, после чего ФБ смесь перемешивается в течение 5–20 минут до однородности.

4.16. Укладка и уплотнение ФБ смеси

Укладку и уплотнение ФБ выполняют способом, гарантирующим однородность и плотность бетона, отвечающих требованиям, предусмотренным для рассматриваемой строительной конструкции (СП 70.13330).

При укладке и уплотнении ФБ смесей следует различать:

- производство сборного ФБ;
- возведение монолитных сооружений и конструкций;
- набрызгбетонирование (торкретирование).

Способы формирования и соответствующую удобоукладываемость бетонных смесей, следует принимать в зависимости от вида конструкций, степени их армирования и применяемой технологии изготовления, характеристик и конструктивно-технологических особенностей формовочного оборудования согласно положениям «Пособия по технологии формирования железобетонных изделий».

Метод набрызгбетонирования (торкретирования) рекомендуется для элементов с открытой поверхностью и большой площадью, в случаях необходимости плоскостной ориентации фибр, в том числе для крепления выработок, откосов, ремонта и реконструкции конструкций транспортных тоннелей, послойного армирования изделий фибрами, армирования фибрами отдельных частей конструкций, например, зон анкеровки арматуры, участков, работающих на восприятие поперечных сил, конструкций с различным насыщением фибрами по участкам.

Удобоукладываемость ФБ смесей может меняться от марки Ж4 с жесткостью более 31 с до марки П5 с осадкой конуса свыше 20 см и уходить в область самоуплотняющихся бетонов с распылом конуса РК более 65 см согласно ГОСТ 7473.

Преимущества торкретбетона с полипропиленовым фиброволокном заключаются в лучшем сцеплении бетонной смеси, что снижает отскок и ускоряет процесс. При высокой дозировке более длинных волокон фибры его прочность может сравниться с бетоном, содержащим 25–30 кг стальной арматуры. Преимущества бетона с полипропиленовыми волокнами заключаются в снижении риска повреждения при распалубке и последующей транспортировке, пониженной проницаемости и меньшей коррозии. Преимущества бетона, армированного полипропиленовыми волокнами при использовании скользящих опалубок, заключаются в лучшем сцеплении бетонной смеси, что способствует повышению темпов строительства и снижению объемов ремонтных работ.

Наполнители способны поглощать ионизирующие излучения, понижать текучесть и объемную усадку, улучшать формуемость и формоустойчивость.

Погрузочно-разгрузочные и транспортные операции ФБ смесей (как со стальной, так и с полимерной фиброй) осуществляют в обычном порядке с использованием воронок, бадей, бункеров, ленточных конвейеров, бетонораздатчиков, бетоноукладчиков, ленточных питателей, секционных, шиберных, челночных затворов и т. п. для сборных и монолитных конструкций; бетононасоса или набрызгустановок – для монолитных и набрызгбетонных конструкций.

Размеры выходных отверстий следует принимать в 2,5–3 раза больше длины применяемых фибр. Приемный бункер бетононасосов должен быть оснащен виброрешеткой.

Высота свободного падения смеси не должна превышать 2,5 м для смеси с подвижностью до П4 и 2 м для подвижности П5.

ФБ смеси марки по удобоукладываемости П1 с осадкой конуса ОК = 1–4 см и ФБ смеси марки Ж1 с жесткостью Ж = 5–10 с, в том числе с различными пластификаторами, применяют с использованием обычного уплотняющего оборудования – глубинных и поверхностных вибраторов, виброплощадок, вибронасадок, виброформ, виброштампов и т. п. при обычных режимах вибрации и ее продолжительности.

При подвижности ФБ смеси П2–П5 режимы виброуплотнения следует определять опытным путем.

Выводы по главе 4

Результаты исследований подтвердили высокую эффективность полипропиленовых волокон в качестве армирующей добавки в бетон. Использование полипропиленовых волокон уменьшает риск потери несущей способности бетона. Эти волокна не только улучшают несущую способность высокопрочного бетона, но и увеличивают его гибкость. За счет высокого сопротивления волокна предотвращают появление трещин и сопротивляются их увеличению. Добавление полипропиленовых фибр уменьшает осадку конуса.

Добавление фибр увеличивает сопротивление бетона при сжатии, и с увеличением их содержания в объеме бетона этот показатель возрастает. Например, в образцах, содержащих $2,7 \text{ кг/м}^3$ полипропиленовых волокон, сопротивление при сжатии бетона увеличилось на 20 %.

Кроме объема, важную роль играет длина. При одинаковых объемах волокон увеличение их длины с 8 мм до 12 мм повышает сопротивление. Но при увеличении их длины до 20 мм сопротивление уменьшается. Это явление объясняется появлением пузырей в бетоне из-за пучков волокон, что ослабляет матрицу бетона и создает трещины.

Дисперсное армирование бетона с использованием полипропиленового фиброволокна и технологии радиального прессования обеспечивает высокое качество уплотнения и достижение средней прочности бетона при осевом растяжении не ниже 4,8 МПа, что позволяет изготавливать безнапорные трубы диаметром до 1000 мм первой и второй групп по несущей способности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фибробетоны представляют класс композиционных материалов, получаемых путем ввода в бетон-матрицу специально изготовленных волокон фибр. Для армирования бетонов используют различные типы фибр. В качестве матрицы используются различные бетоны. В транспортном строительстве наибольшее распространение получили фибробетоны. В несущих конструкциях, как правило, применяют тяжелые бетоны. Широкий выбор вариантов говорит о том, что часто бывает трудным правильно определить, какая именно фибра необходима для выполнения той или иной задачи. Одним из основных вопросов, стоящих сегодня перед теми, кто использует волокна, является не только отсутствие знаний, но и неправильное использование фибры разного вида.

В Беларуси особенности фибробетона, в основном, рассматриваются в СТБ EN 14889-1, ASTM C 116-03 и СТБ EN 14889-2 «Фибры для бетона». Фибробетон должен отвечать требованиям ГОСТ 26633 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые» и ГОСТ 25192 «Бетоны. Классификация. Общие технические требования».

Чтобы правильно определить необходимый тип волокна, нужно конкретно сформулировать задачу. Международный стандарт ASTM C 116-03, описывающий армирование бетонов и торкретирование фиброй, определяет три общих класса армированного бетона:

- армированный стальными волокнами бетон;
- армированный стекловолокном бетон;
- армированный полимерными волокнами бетон.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урецкая, Е. А. Сухие строительные смеси: материалы и технологии / Е. А. Урецкая, Э. И. Батяновский. – Минск : НПООО «Стринко», 2001. – 208 с.

2. Строительные материалы [Электронный ресурс] / Интернет-издание «Строительные материалы». – Минск, 2014. – Режим доступа: http://www.grad.sml.by/index.php?id-9&Itemid=5&option=com_content&task=view. – Дата доступа : 15.11.2015.

3. Экобори, Т. Научные основы прочности и разрушение материалов / Т. Экобори. – Киев : Навукова думка, 2008. – С. 78–99.

4. Органические добавки в бетон [Электронный ресурс] / Экология на предприятии. – Минск, 2015. – Режим доступа: http://ecologia.by/number/2011/2/ispolzovanie_dobavok_v_betonk. – Дата доступа : 15.11.2015.

5. Смоликов, А. А. Бетон, армированный нановолокнами / А. А. Смоликов // Научно-технический и производственный журнал «Бетон и железобетон». – 2009. – № 4. – С. 8–9.

6. Строительство [Электронный ресурс] / Интернет-издание «Строительство». – Минск, 2014. – Режим доступа: <http://stroitel.by/by/polipropilenvolokna>. – Дата доступа : 08.07.2015.

7. Hertz, K. A. Heat Induced Explosion of Dense Concretes / K. A. Hertz. – Report No. 166. – Copenhagen: Institute of Building Design, Technical University of Denmark, 1984. – P. 128.

8. Hertz, K. A. Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures / K. A. Hertz. – Copenhagen: ACI Spring Convention, Beton, 1991. – 200 p.

9. Diederichs, U. L. Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures / U. L. Diederichs, U. M. Jumpanen, V. A. Penttala. – Helsinki : IABSE 13th Congress, 1988. – 150 p.

10. Castillo, C. C. Effect of transient high temperature on high-strength concrete / C. C. Castillo, A. J. Durrani. – Rome : ACI Material Journal, 1990. – P. 47–53.

11. Felicetti, R. B. Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles / R. B. Felicetti, P. G. Gambarova, G. P. Rosati. – Paris: Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-performance Concrete, 1996. – 250 p.

12. Phan, L. T. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures / L. T. Phan, N. J. Carino. – London : ACI Materials Journal, 2002. – P. 54–66.

13. Han, C. G. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement / C. G. Han, Y. S. Hwanga, S. H. Yangb. – New York : Cement and Concrete Research, 2004. – P. 1747–1753.

14. Behnood, A. H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures / A. H. Behnood, H. C. Ziari. – Paris : Cement & Concrete Composites, 2008. – P. 106–112.

15. Sahmaran, M. N. Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites / M. N. Sahmaran, M. R. Lachemi, V. C. Li. – Tehran : ACI Materials Journal, 2010. – P. 297–304.

16. Рабинович, Ф. М. Дисперсно-армированные бетоны / Ф. М. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1989. – С. 117–147.

17. Рамчандран, В. Наука о бетоне : физико-химическое бетоноведение / В. Рамчандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуен; пер. с англ.; под ред. В. Б. Ратинова. – М. : Стройиздат, 1986. – С. 142–157.

18. Козина, В. Л. Повышение ударопрочности и трещиностойкости крупноразмерных изделий на основе гипсоцементнопуццоланового бетона путем введения низкомолекулярных полимерных волокон : автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1979. – 18 с.

19. Козлов, В. В. Гидроизоляционные цементные композиции с низкомолекулярными волокнами / В. В. Козлов, М. З. Каган, Р. М. Ахмеднабиев, Г. М. Богомолов. – Метрострой, 1983. – № 6. – 23 с.

20. Купер, Д. Растрескивание и разрушение композитов / Д. Купер, М. Пигготт. – Механика разрушения. – М.: Мир, 1979. – № 17. – С. 165–216.

21. Козлов, В. В. Улучшение физико-механических свойств цементных составов для зачеканки швов обделки тоннелей / В. В. Козлов, О. Л. Фиговский, Р. М. Ахмеднабиев. – Транспортное строительство, 1983. – 18 с.

22. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология,

конструкции / Ф. Н. Рабинович. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов «АСВ», 2004. – 560 с.

23. Применение добавок в бетоны [Электронный ресурс] / Эффективность применения волокнистых добавок в бетон. – Минск, 2014. – Режим доступа : <http://www.nestor.minsk.by/sn/2008/02/sn80215.html>. – Дата доступа: 03.04.2014.

24. Грибов, Р. А. Моделирование поведения фибробетонных конструкций в условиях радиационного облучения / Р. А. Грибов // Научно-технический и производственный журнал Бетон и железобетон. – С. 19–20.

25. Тимашов, В. В. К вопросу об армировании цементного камня / В. В. Тимашов, И. И. Сычева, Н. С. Никонова // Тр. МХТИ им Д. И. Менделеева : Вып. 2. – М., 1976. – С. 155–156.

26. Иранское научное издание [Электронный ресурс] / Строительство Ирана. – Тегеран, 2009. – Режим доступа: <http://www.sedika.ir/articles-info>. – Дата доступа : 15.05.2012.

27. Применение добавок в бетоны [Электронный ресурс] / Эффективность применения волокнистых добавок в бетон. – Минск, 2014. – Режим доступа : <http://www.nestor.minsk.by/sn/2008/02/sn80215.html>. – Дата доступа : 03.04.2014

28. Строительное издание Франции [Электронный ресурс] / Строительство сегодня. – Леон, 2015. – Режим доступа : <http://www.bildingtoday.html>. – Дата доступа : 10.03.2015.

29. Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity: BS EN 14889-1:2006. – Publication Date 29.09.06. – The European Committee for Standardization : BSI, 2006. – 30 p.

30. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete: ASTM C116 / C116-03. – Publication Date 10.05.08. – ASTM International : West Conshohocken, 2008. – 22 p.

31. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory: ASTM C 192 / C192M-14. – Publication Date 01.01.14. – ASTM International : West Conshohocken, 2014. – 25 p.

32. Власов, В. К. Механизм повышения прочности бетона при введении микрополнителя / В. К. Власов // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 9–11.

33. Красный, И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микрополнителей / И. М. Красный // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 10–11.

34. Matsufuji, Y. Прочностные характеристики растворов содержащих сверхтонкие частицы / Y. Matsufuji, H. Kohhata, S. Harada // *Semento konkurito ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr.* – 1991. – № 45. – P. 264–269.
35. Власов, В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками / В. К. Власов // *Бетон и железобетон.* – 1993. – № 4. – С. 10–11.
36. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – 2-е изд., переработ. – М.: Стройиздат, 1973. – 480 с.
37. Высоцкий, С. А. Минеральные добавки для бетонов / С. А. Высоцкий // *Бетон и железобетон.* – 1994. – № 2. – С. 7–10.
38. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and case Histories / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – Ottawa, Canada : Marguardt Printing Ltd., 2002. – P. 101.
39. Malhotra, V. M. Pozzolanic and Cementitious Materials / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – Gordon and Breech Publishers, 1996. – P. 191.
40. Власов, В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками / В. К. Власов // *Бетон и железобетон.* – 1993. – № 4. – С. 10–12.
41. Bastian, S. Wodoszczelnosc betonow z popiolow lotnych / S. Bastian // *Przeglad Budowlany.* – 1971. – № 6. – P. 319–329.
42. An investigation of the Pozzolanic nature in coal ash // *End. News Rec.*, V. 71, 1914. – № 24. – P. 1334–1335.
43. Баженов, Ю. М. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами. / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин // *Изв. вузов. Строительство.* 1996. – № 7. – С. 55–58.
44. Методы испытания и расчета фибробетонных конструкций : RILEM TC 162-TDF // *Materials and Structures.* – RILEM Publication SARL, 2003. – P. 560–567.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

ACI 506./5R-09. Guide for Specifying Underground Shotcrete 2009.

ACI 544.2R-89. Оценка свойств фибробетона. (Руководство, США) 1999.

ACI 544.4R-88. Расчетные положения по сталефибробетонам. (Руководство, США).

ASTM C 116-03. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete.

ASTM C192 / C192M-14. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

ASTM C 1550 EN-Standard. Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). Стандартный метод испытания на прочность при изгибе армированного фиброволокном бетона (передача нагрузки в центр круглого образца-панели).

ASTM C 1609/C 1609M – 10. Стандарт на испытание. Способ определения несущей способности фибробетонов на растяжение при изгибе (с использованием загрузки в 1/3 пролета – четырехточечного нагружения). (Стандарт, США).

ASTM C 1018. Упругая деформация и прочность на изгиб до первой трещины. Методы испытания.

ASTM C 267. Определение химической стойкости. Методы испытания.

EN 11039:2003. Экспериментальный метод определения прочности сталефибробетона в ранней стадии трещинообразования и индексов дуктильности.

EN 14488-3-2006. Испытание торкретбетона. Часть 3: Прочность на изгиб (прочность первой трещины, прочность растяжения при изгибе и остаточная прочность) от волокнисто-усиленных бетонных образцов для испытания в форме балки.

EN 14651-2007. Фибробетон металлический. Метод испытания. Измерение прочности на изгиб (предел пропорциональности остаточный).

EN 14845-1-2007. Волокна в бетоне. Методы испытания. Часть 1. Эталонные бетоны.

EN 14845-2-2006. Волокна в бетоне. Методы испытания. Часть 2. Воздействие на бетон.

EN 14889-1-2009. Волокна для бетона. Часть 1. Стальные волокна. Определения, технические условия и соответствие.

EN 14889-2-2009. Волокна для бетона. Часть 2. Полимерные волокна. Определения, технические условия и соответствие.

ISO 11357-3:2011. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия. Часть 3. Определение температуры и энтальпии плавления и кристаллизации.

ТР 2009/013/ВУ*. Технический Регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия безопасность. Издание официальное.

ВСК 35-70. Технические указания по уходу за свежееуложенным бетоном дорожных и аэродромных покрытий.

ВСН 126-90. Крепление выработок набрызгбетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. Нормы проектирования и производства работ.

ВСН 48-93. Правила возведения монолитных бетонных и железобетонных обделок для транспортных тоннелей. Ведомственные строительные нормы.

ВСН 56-97. Ведомственные строительные нормы по проектированию и основным положениям технологий производства фибробетонных конструкций.

ВСП 32-01-02/МО РФ. Правила по производству и приемке работ при строительстве аэродромов вооруженных сил Российской Федерации. Система ведомственных нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации объектов Министерства обороны Российской Федерации. Ведомственный свод правил.

ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия (С Изменениями № 1, 2).

ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением № 1). Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 12.1.044-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

ГОСТ 12.2.003-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности. Группа Т58. Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 12730.0-78. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости.

ГОСТ 13015.1-81. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Приемка.

ГОСТ 13087-81. Бетоны. Методы определения истираемости.

ГОСТ 17623-87. Бетоны. Радиоизотопный метод определения средней плотности.

ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

ГОСТ 18105-86. Бетоны. Правила контроля прочности.

ГОСТ 20054-2016. Трубы бетонные безнапорные. Технические условия. Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 21718-84. Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности.

ГОСТ 22266-2013. Цементы сульфатостойкие. Технические условия. Межгосударственный стандарт.

ГОСТ 22690-88. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.

ГОСТ 22783-77. Бетоны. Метод ускоренного определения прочности на сжатие.

ГОСТ 23422-87. Материалы строительные. Нейтронный метод измерения влажности.

ГОСТ 23464-79. Цементы. Классификация.

ГОСТ 24211-2003. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие ТУ.

ГОСТ 24316-80. Бетоны. Метод определения тепловыделения при твердении.

ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

ГОСТ 24544-81. Бетоны. Метод определения деформаций усадки и ползучести.

ГОСТ 24545-81. Бетоны. Методы испытаний на выносливость.

ГОСТ 25192-82. Бетоны. Классификация. Общие технические требования.

ГОСТ 26134-84. Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости.

ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые.

ГОСТ 28570-90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.

ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

ГОСТ 30515-97. Цементы. Общие технические условия.

ГОСТ 310.1-76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения (с Изменением № 1).

ГОСТ 310.2-76. Цементы. Методы определения тонкости помола (с Изменением № 1).

ГОСТ 310.3-76. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением № 1).

ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии (с Изменениями № 1, 2).

ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия.

ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.

ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.

ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытания.

ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия.

ГОСТ 8267-95. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний.

ГОСТ 8735. Реакционная способность заполнителей.

ГОСТ 8736-93. Песок для строительных работ. Технические условия.

ГОСТ 8829. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.

ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.

ГОСТ 969-91. Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые. Технические условия.

ГОСТ Р 54257. Надежность строительных конструкций и оснований.

ГОСТ Р ISO 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерения.

Закон Республики Беларусь от 05.07.2004 № 300-З (ред. от 13.07.2012) «Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности в Республике Беларусь».

ОДМ 218.2.014-2011. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по применению сталефибробетона при ремонте мостовых сооружений.

П1-99 к СНиП 3.09.01-85. Применение добавок в бетоне.

П2-01 к СНиП 3.09.01-85. Изготовление сборных бетонных и железобетонных изделий.

ПБ-03-428-02. Правила безопасности при строительстве подземных сооружений.

Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ27006-86).

РТМ 17-01-2002. Руководящие технические материалы по проектированию и применению сталефибробетонных строительных конструкций.

СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции.

СНБ 5.03.02-03. Производство сборных бетонных и железобетонных изделий.

СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.

СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция.

СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция.

СНиП П-21-75 Марки бетона на растяжение.

СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 (с Изменениями № 1, 2).

СП 121.13330.2012. Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96.

СП 122.13330.2012. Свод правил «Тоннели железнодорожные и автодорожные», актуализированная редакция СНиП 32-04-97.

СП 131.13330.2012. Строительная климатология, актуализированная редакция СНиП 23-01-99*, с изменениями 17 ноября 2015 г.

СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81*. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*.

СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85.

СП 32.105.2004. Метрополитены, актуализированная редакция СНиП 32-02-2003, СНиП III-44-77 Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические.

СП 52-101.2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры.

СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции.

СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями № 1, 2, 3).

Спецификации по тоннелестроению Английской тоннельной ассоциации. Третье издание. Армирование фиброй.

СТБ 1035-96 Смеси бетонные. Технические условия.

СТБ 11.0.02-95 Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность. Общие термины и определения.

СТБ 11.0.03-95 Система стандартов пожарной безопасности. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения.

СТБ 1112-98 Добавки для бетонов. Общие технические условия.

СТБ 1114-98. Вода для бетонов и растворов. Технические условия.

СТБ 1152-99. Плиты тротуарные и камни бортовые бетонные вибропрессованные. Методы определения прочности и морозостойкости.

СТБ 1163-2012. Трубы бетонные и железобетонные безнапорные. Технические условия.

СТБ 1168-99. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона.

СТБ 1182-99. Бетоны. Правила подбора состава.

СТБ 1311-2002. Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия.

СТБ 1544-2005. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. Минстройархитектуры. РУП Стройтехнорм.

СТБ 4.212-98. Система показателей качества продукции. Строительство. Бетоны. Номенклатура показателей.

СТБ 942-93. Портландцемент безусадочный. Технические условия.

СТО 11502704-001-2010. Конструкции фибробетонные с использованием полиолефиновых волокон «ArmaFiber®» для объектов транспортного строительства. Стандарт организации.

СТО 35203022-001-2013. Конструкции фибробетонные с использованием полиолефиновых волокон 3М Scotchcastm для объектов транспортного строительства. Технические условия. Стандарт организации.

СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Стандарт организации.

СТО Нострой – 43-2012. Применение в строительных бетонных и геотехнических конструкциях неметаллической композиционной арматуры. Стандарт организации.

СТО Нострой 2.27.125-2013. Национальное объединение строителей. Стандарт организации. Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ. Издание официальное. Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ «Тоннели и метрополитены». Акционерное общество «Центральный институт типового проектирования им. Г. К. Орджоникидзе».

Технический регламент утвержден Постановлением Правительства РФ от 15.09.2009 г. № 753. О безопасности машин и оборудования.

Технический регламент утвержден Постановлением Правительства РФ от 24.12.2009 г. № 1213. О безопасности средств индивидуальной защиты.

ТКП 45-1.01-221-2010. Строительство. Оценка системы производственного контроля. Основные положения и порядок проведения.

ТКП 45-2.01-111-2008. Защита строительных конструкций от коррозии. Строительные нормы проектирования.

ТКП 45-2.02-142-2011. Здания, строительные конструкции, материалы и изделия. Правила пожарно-технической классификации.

ТКП 45-2.02-279-2013. Здания и сооружения. Эвакуация людей при пожаре. Строительные нормы проектирования.

ТУ 0882-193-46854090-2009. Фибра стальная фрезерованная для армирования бетона. Технические условия.

ТУ 0991-123-53832025-2001. Фибра стальная для дисперсного армирования бетона. Технические условия.

ТУ 1211-205-46854090-2005. Фибра стальная проволочная для армирования бетона. Технические условия.

ТУ 1276-001-70832021-2010. Фибра из тонкой низкоуглеродистой проволоки. Технические условия.

ТУ 14-1-5536-2006. Фибра стальная волнистая из холоднотянутой проволоки. Технические условия.

ТУ 5743-048-02495332. Микрокремнезем конденсированный. Технические условия.

ТУ 5870-005-58042865-05. Суперпластификатор Полипласт СП-1.

ТУ ВУ400074854.020-2005. Проволока стальная РМЛ. Технические условия.

ТУ РБ 400518274.003-2003. Фибра стальная высокоуглеродистая ФСВ. Технические условия.

Учебное издание

ЛЯХЕВИЧ Генрих Деонисьевич
ГРЕЧУХИН Владимир Александрович
РОЖАНЦЕВ Сергей Юрьевич

**БЕТОН ДЛЯ МОСТОВЫХ И ТОННЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ, АРМИРОВАННЫЙ
ОРГАНИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ**

Пособие
для студентов специальности 1-70 03 02
«Мосты, транспортные тоннели и метрополитены»

Редактор *Н. А. Костешева*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 03.01.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,99. Уч.-изд. л. 4,68. Тираж 100. Заказ 588.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.