

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство»

(наименование кафедры)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Технология строительного производства

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Исследование свойств фибробетонов с использованием фибры  
различного вида

Студент

Ю.А. Прокофьева

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

В.Н. Шишканова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.э.н., к.т.н., профессор

А.А. Руденко

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«    »                      2019 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Д.С. Тошин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«    »                      2019 г.

Тольятти 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Теоретические аспекты производства фибробетонов и их применение в строительной индустрии .....	8
1.1 Проблемы, состояние вопроса и перспектива в области развития производства фибробетонов .....	8
1.2 Виды, характеристика фибробетонов и армирующих волокон для их производства.....	11
1.3 Оценка возможности применения отходов производства в качестве армирующего волокна для изготовления фибробетонов.....	18
2 Характеристика применяемых материалов для исследования и методы испытаний .....	25
2.1 Свойства и характеристики применяемых для производства фибробетонов материалов.....	25
2.2 Применяемое оборудование.....	34
2.3 Технология изготовления образцов .....	35
2.4 Методы испытаний исходных материалов и фибробетонов .....	36
3 Исследование основных закономерностей и процессов образования структуры фибробетона с использованием фибры различного вида .....	37
3.1 Исследование свойств бетона с металлическими армирующими волокнами.....	37
3.2 Исследование свойств бетона с полипропиленовыми армирующими волокнами.....	50
3.3 Исследование свойств фибробетона с использованием фиброволокна из отходов производства .....	61
3.4 Техничко – экономическое обоснование использования фибробетона на основе металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	72

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В современном строительстве практически каждый день происходит внедрение новых технологий и осуществляется выпуск модернизированных и эффективных строительных материалов. При этом строительным материалам уделяется значимая роль, и конструкциям из бетона особенно по целому ряду факторов.

В современной реальности строительство жилищного и промышленного назначения набирают стремительные темпы роста, при ежегодном вводе в эксплуатацию тысяч сооружений, спрос при этом на строительные объекты не снижается.

Известно, что ведущим материалом при возведении практически любого вида недвижимости, не зависимо от его назначения, размеров, формы и типа, является бетон.

На сегодняшний день показатель мирового объема производства бетона составляет 2 млрд. м<sup>3</sup>, когда показатели выпускаемой промышленной продукции и строительных материалов иных видов сравнительно ниже [15].

Под бетоном понимают искусственный каменный материал, полученный путем формирования и твердения рационально подобранной вяжущей смеси, с заполнителем мелкой и крупной фракции, воды и при необходимости специальных добавок. Формирование жесткости и восприятие нагрузки от внешних воздействий полностью зависит от применения заполнителя, что способствует уменьшению усадки бетона и возникновению усадочных трещин.

Бетон остается основным конструкционным материалом в различных эксплуатационных условиях, так как высок показатель архитектурно – строительной выразительности, малой энергоемкости и эксплуатационной надежности. Наряду с простотой и доступностью технологии этого материала, возникает шанс усовершенствования бетона с помощью применения отходов производства.

Использование отходов производства в эффективных строительных материалах, таких как бетон, решает вопрос, связанный со снижением стоимости строительства и обеспечивает нормативные показатели уровня качества производимой продукции.

Из бетонов, которые относятся к новым видам и активно внедряются в производство, выделяют фибробетон, состав которого может включать в себя фиброволокно различного вида. Армированный бетон – это классическое сочетание мелкозернистых бетонов с различными армирующими волокнами: стальными, стеклянными или синтетическими. Данный вид бетона предназначен для формирования конструкций с особой прочностью.

В современном мире большое внимание уделяется изучению и усовершенствованию физико – механических и деформативных характеристик фибробетона.

Актуальность темы связана с тем, что применение фибры в бетоне обеспечивает бетону более высокие показатели по таким характеристикам как прочность на растяжение, изгиб, срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость, морозостойкость, водонепроницаемость, жаропрочность и пожаростойкость. Кроме того отличительными особенностями фибробетонов являются высокие показатели анизотропности и дискретности. При этом, такие признаки способствуют возможности выделить фибробетоны в независимую группу конструкционных материалов, отличающихся особенностями строения и свойствами.

Данная магистерская диссертация посвящена исследованию физико – механических свойств фибробетонов, изготовленных с использованием фибры различного вида, в том числе из отходов производства.

Цель работы состоит в определении влияния различных видов фибр, в том числе и отходов промышленного производства, на прочностные характеристики фибробетонов.

Предметом исследования магистерской диссертации является составы и свойства фибробетонов.

Объект исследования магистерской диссертации – фибробетоны с использованием металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства – полиамидного волокна.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть теоретические аспекты производства фибробетонов и их применение в строительной индустрии.

2. Проанализировать свойства и характеристики применяемых материалов для исследования с выбором требуемых методов испытаний.

3. Исследовать основные закономерности и процессы образования структуры фибробетона с использованием металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства – полиамидного волокна.

4. Исследовать физико – механические свойства в процессе твердения фибробетонов на металлической, полипропиленовой фибре и фибре из отходов производства – полиамидном волокне.

5. Подобрать оптимальный состав фибробетонов с использованием микронаполнителя и гиперпластификатора на основе поликарбоксилата.

Методы исследования – анализ, сравнение, наблюдение, эксперимент, описание.

Научная новизна диссертационной работы, заключается в следующем:

1. Исследованы физико – механические свойства в процессе твердения самоуплотняющегося мелкозернистого фибробетона на металлической, полипропиленовой фибре и фибре из отходов производства – полиамидном волокне.

2. Подобран оптимальный состав фибробетонов с использованием микронаполнителя и гиперпластификатора на основе поликарбоксилата, что позволяет сократить расход цемента при одновременном улучшении физико

– механических характеристик фибробетонов на металлической, полипропиленовой фибре и фибре из отходов производства – полиамидном волокне.

Установлена возможность использования в мелкозернистом самоуплотняющемся фибробетоне в виде фиброволокна отходов производства «КуйбышевАзот» – полиамидных волокон. Это позволяет снизить себестоимость монолитных конструкций без снижения их физико – механических характеристик.

Практическая значимость. Разработаны составы мелкозернистых самоуплотняющихся фибробетонов на основе портландцемента, наполнителя цемента – микрокремнезема, гиперпластификатора, металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов промышленного производства. Данные составы могут использоваться для изготовления наливных полов промышленных зданий и фундаментов под оборудование.

Апробация результатов исследования. Основное содержание и результаты исследований магистерской работы обобщены и изложены в научных публикациях, в том числе:

– Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции №5. Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом., г. Екатеринбург. – НН: ИЦРОН, 2018. – С. 57 – 60.

– Наука и образование: новое время. 2019. № 2 (31). С. 99 – 106.

Результаты исследований доложены на научно-практической конференции «Студенческие дни науки в ТГУ», 2018г.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в решение экспериментально – теоретических вопросов о дисперно – армированных бетонах внесли такие ученые практики как А.А. Гвоздев; В.В. Бабков; В.М. Бондаренко; Ю.М. Баженов; Ю.В. Зайцев; Ю.В. Пухаренко; И.В. Волков; И.А. Лобанов; Г.П. Бердичевский; Л.Г. Курбатов; К.В. Михайлов; Б.А. Крылов; Р.А. Малинина; Ф.Н. Рябинович; Р.Л. Маилян; Б.Г. Скрамтаев; В.П.

Харчевников; К.В. Талантова; Ф.П. Янкелевич; Е.М. Чернышов; Дж. Купер; Г.С. Холистер и другие.

Вместе с тем отдельные проблемы и направления исследований, связанные с применением в фибробетонах отходов промышленного производства проработаны и исследованы не достаточно, что и предопределило выбор темы исследования.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников из 44 наименований. Общий объем работы изложен на 76 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 34 таблицы.

# **1 Теоретические аспекты производства фибробетонов и их применение в строительной индустрии**

## **1.1 Проблемы, состояние вопроса и перспектива в области развития производства фибробетонов**

Большинство современных открытий использовались и применялись в различном виде прошлыми поколениями. Так в современное время изобретатели просто успешно доработали опыт предшествующего поколения с применением современных технологий и материалов.

К одним из таких изобретений можно отнести разработку нового строительного материала, такого как фибробетон, который по результатам анализа формирования и улучшения бетонов и конструкций является высокоперспективным материалом XXI века [16]. Фибробетон появился в 1874 году, после экспериментов английского строителя с обычным бетоном, добавляя в него смеси разных материалов. Анализируя литературные источники, можно утверждать, что в 1960 – х годах началось широкое исследование в области производства фибробетона [21]. В 1979 году в Ленинграде впервые в России было осуществлено применение фибробетона, с расходом фиброволокна 1,5% на объем бетонной смеси, при устройстве дна резервуара для технической воды [34].

Бетон за последние 300 лет является самым распространенным и популярным строительным материалом. По своим физическим характеристикам бетон уступает строительным материалам природного происхождения, но побеждает в простоте применения и стоимости. Наряду с этим строители стремились увеличить его прочностные характеристики и в то же время сократить затраты [37].

К новому поколению бетонов относятся дисперсно – армированные бетоны, появление которых обусловлено развитием инновационных технологий, сменяющих уже существующие виды. Фибробетон есть разновидность цементного мелкозернистого бетона, с равномерно



распределенными фиброволокнами, осуществляющими функцию армирующих компонентов. Под фиброволокнами подразумеваются естественные либо искусственные волокна материалов [33].

В большинстве стран активно развивается научно – исследовательская деятельность, в которой исследуются свойства дисперсно армированных бетонов. Наиболее часто фибробетон применяется при возведении фундаментов под оборудование, сопровождающего динамическими действиями, в дорожном строительстве и при облицовке тоннелей [20].

В строительстве промышленного и гражданского назначения полимеры, армированные фиброй различного вида, находят применение в ограждающих элементах зданий и сооружений. Изготовленные из фибробетона стены, перегородки, перекрытия, покрытия, полы, конструкции специального назначения, такие как: трубы, каналы, лотки, шпунты, кольца и тубинги обладают хорошими эксплуатационными свойствами [25, 26].

В зарубежном строительстве дисперсно – армированные бетоны применяют при строительстве мостов, дорог, туннелей, (возведении морских платформ), также используют при устройстве полов промышленных зданий и сооружений [19].

Положительно себя зарекомендовали в дорожном строительстве плиты выполненные из фибробетона. Эти плиты применяются в качестве несъемной опалубки при сооружении мостов, что позволяет существенно упростить и ускорить процесс заливки конструкций. Для плит мостового настила различной толщины и разных пролетов между главными балочными фермами опорной частью может служить опалубка, выполненная из фибробетона. Опалубка имеет хорошую совместимость с бетоном, благодаря этому она является составной частью монолитных бетонных конструкций. Также высок показатель степени прочности при воздействии химических веществ, что способствует возможности использования этого материала при сооружении гидроизоляционных покрытий, водоотводных лотков и

канализационных коллекторов [33]. Данные по применению фибробетонов в строительстве приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Применение фибробетонов в строительстве

Наименование конструкций, элементов и сооружений	
Монолитные	Сборные
Покрытия автодорог	Железнодорожные шпалы
Мостовые настилы	Балки
Фундаменты и несущий каркас зданий повышенной этажности	Ступени
Водоотводные дамбы	Стеновые панели
Огнезащитная штукатурка	Трубопроводы
Промышленные полы	Кровельные панели и черепица
Самонивелирующиеся полы	Взрывоустойчивые конструкции
Пространственные покрытия и сооружения	Элементы пространственных покрытий и сооружений
Оборонные сооружения	Сваи и шпунты

Выделяют следующие достоинства фибробетонов:

- фибробетон обладает высокими эксплуатационными качествами;
- снижение затрат, за счет использования фиброволокна вместо армирующего каркаса или сетки;
- фибробетон стоек к температурным воздействиям, влагостоек и морозостоек;
- фибробетон обладает хорошими адгезионными качествами;
- фибробетон имеет меньший вес по сравнению с обычным бетоном;
- срок службы выше по сравнению с обычным бетоном.

К недостаткам фибробетонов относят:

- повышенный износ бетоносмесительного оборудования;
- высокую стоимость в сравнении с обычным бетоном. Данный недостаток компенсируется долговечностью материала. Так же использование отходов промышленного производства постепенно снизят стоимость фибробетона.

Дисперсно армированные бетоны дают экономический эффект за счет высоких показателей долговечности, эксплуатационной пригодности, износостойкости, а также повышения межремонтного ресурса и безопасности зданий и сооружений при пожарах и сейсмических воздействиях [26].

Активное производство и успешное использование фибробетона практикуется более чем в ста странах мира. С каждым годом этот материал применяют в новых сферах строительства. На сегодняшний день в России номенклатура и показатель объема выпускаемой продукции выполненной из фибробетона невелики, тем не менее, опыт зарубежных стран убеждает российских специалистов в перспективности использования данного строительного материала [33].

Возрос показатель объема научно – технических публикаций, посвященных дисперсному армированию строительных материалов [16]. Результаты научных исследований докладывают на конференциях и научно – технических семинарах, поднимаются вопросы о практическом использовании фибробетонов в строительной индустрии [17]. Также данной проблеме посвящаются международные конгрессы и симпозиумы [19].

## **1.2 Виды, характеристика фибробетонов и армирующих волокон для их производства**

Композиции, выполненные из дисперсно – армированных бетонов, являются строительными конструкциями, обладающими высокими показателями прочности на изгиб и ударную вязкость. Выбор дисперсно – армированных волокон обуславливается тем, какими характеристиками должна обладать конструкция, чтобы удовлетворять заданным требованиям [31].

В современном строительстве бетоны дисперсно армируют металлическими (чаще стальными) и неметаллическими (минеральными, синтетическими и другими) высоко – и низко модульными фиброволокнами с различной длиной и поперечным сечением. Стальные волокна получают при резке низкоуглеродистой проволоки, листовой стали, фольги, также формируют из расплава и фрезерованием полосок и слябов. Фибра неметаллического происхождения (синтетическая, базальтовая, стеклянная и другие) представляет собой моноволокна в виде отрезков, комплексные нити

и фибриллированную пленку, при изготовлении которых, в ряде случаев, применяют промышленные отходы соответствующих производств.

Эффективность фибробетонов достигается правильным сочетанием свойств составляющих его компонентов. Важным компонентом этих бетонов являются фиброволокна – стальные или неметаллические.

Фибробетон классифицируют в зависимости от материала фиброволокна. В настоящее время бетоны армируют фиброволокнами следующего вида:

1. Стальная фибра – отрезки стальных волокон.

Производится следующими способами:

- резка тонкой проволоки или стального листа;
- вытяжка (экструдирование) стального расплава;
- фрезерование специальных слябов.

Стальная фибровая арматура достаточно эффективна с учетом стоимости. Модуль упругости такой фибры в 5 – 6 раз больше модуля упругости бетона. Такое фиброволокно может иметь круглое, прямоугольное и другое поперечное сечение размером от 0,2 – 1,6 мм и длиной от 5 – 160 мм [39].

Сталефибробетоны – это сочетание мелкозернистого и тяжелого бетона со стальной фиброй, равномерно распределенной по объему бетона, совместная работа которых обеспечивается за счет сцепления анкеров на концах фибр и их поверхности.

По сравнению с традиционным железобетоном сталефибробетон рекомендуют для изготовления конструкций, использование которых наиболее эффективно. Технические преимущества сталефибробетона по сравнению с обычным железобетоном [38]:

- повышение трещиностойкости, ударной прочности, вязкости разрушения, износостойкости и морозостойкости;
- понижение усадки и ползучести;

- использование более эффективных конструктивных решений, таких как тонкостенные конструкции, конструкции без стержневой, сетчатой распределительной или поперечной арматуры;
- снижается показатель трудозатрат на арматурные работы, повышается степень механизации производства;
- применение новых технологий формования армированных конструкций, таких как торкретирование.

## 2. Стекловолоконная фибра – стекловолоконная мононить.

При дисперсном армировании бетона применяют особое щелочестойкое стекловолокно, поскольку обыкновенное алюмоборосиликатное, то есть бесщелочное, волокно довольно быстро подвергается коррозии в щелочной среде при твердении бетона, что требует специальных защитных мероприятий. За рубежом используют щелочестойкое стекловолокно марки «Цем – Фил», разработка и выпуск которого осуществляется в Великобритании. В Японии изготавливают стекловолокно «Эрфайб» и «Эрфайб – супер» – повышенная стойкость к воздействию щелочей. В России для армирования бетона практикуют НПО «Стекло», опытно промышленный масштаб которого составляет 90 – 200 т в год, щелочестойкое стекловолокно марки СЦ – 6 [38].

3. Базальтовая фибра – материал натурального происхождения, представляющий собой короткие отрезки.

Базальтовое волокно обладает высокой прочностью от 1900 – 3900 МПа и высокой степенью дисперсности армирования бетона, что влечет за собой повышение прочности и деформативности, а также обладает мощной исходной сырьевой базой.

Фибробетон на основе базальтового волокна переносит большие упругие деформации, так как базальтовое волокно практически не имеет пластических деформаций при растяжении, модуль упругости базальтофибробетона превосходит бетон в 3 и более раза. За счет небольшой плотности базальтового волокна, происходит облегчение конструкций,

общий вес здания и расходы на строительство уменьшаются. Толщина волокон составляет 10 – 12 мкм, этому способствует показатель поверхности сцепления с цементной матрицей до 100000 м/кг в зависимости от дозировки волокна [28].

4. Синтетические полипропиленовые волокна – тонкие волокна белого или желтого цвета, длиной 6 – 12 мм.

Эффективно применяется для улучшения реологических свойств бетонных смесей, способствует структурообразованию бетонной матрицы на стадии твердения и повышению долговечности. Фибра из таких волокон отличается химической стойкостью и не высокой стоимостью.

Высокомодульный полипропилен отличается высоким модулем упругости до 800 МПа, высокой механической прочностью до 500 МПа и химической стойкостью, также широк температурный диапазон применения от -60 °С до -320 °С, радиопрозрачностью и неэлектропроводностью.

Синтетическая добавка способствует получению дополнительных свойств:

- отсутствуют микротрещины и расслоения;
- повышается способность сопротивления к агрессивным средам и устойчивость к нагрузкам и деформациям;
- повышается влагустойчивость и долговечность;
- прекращается образование пыли.

5. Акриловые волокна (полиакрилонитрильные волокна) – получают из акрилонитрила – продукт, полученный путем переработки каменного угля, газа или нефти. При полимеризации из акрилонитрила получают полиакрилонитрил. Из его раствора формируется фибровое волокно, которое подвергают вытягиванию, промывке, засмаливанию, гофрированию и сушке. Волокна приобретают вид длинных нитей и штапеля. Данный вид волокон устойчив к воздействию сильных кислот со средним показателем концентрации даже в процессе нагревания и устойчив к щелочам средней концентрации.

Поперечное сечение полиакрилонитрильного фиброволокна имеет форму фасоли или гороха и шероховатую поверхность благодаря технологии мокрого прядения [23, 24].

Также используют в качестве наполнителя фиброволокна следующих видов: полиэтиленовые волокна; нейлоновые волокна; вискозные сверхпрочные; полиэфирные; хлопковые; карбоновые; углеродные волокна, которые являются наиболее эффективными с позиции прочности и долговечности при экстремальном химическом и пожарном воздействиях; асбестовые; смешанная фибра.

Распространенными видами дисперсных волокон являются: металлическая, полипропиленовая, базальтовая, стеклянная, углеродная и целлюлозная фибра. При изготовлении фибробетона большое влияние оказывает выбор волокна, тип вяжущего и оптимально подобранный химический состав нитей. Основные характеристики чаще всего используемых видов волокон приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные характеристики различных видов фиброволокон

Характеристика	Вид фибры			
	Стальная	Стеклянная	Полипропиленовая	Базальтовая
1	2	3	4	5
Длина фиброволокна, мм	30 – 50	4,5 – 18	6 – 18	3,2 – 15,7
Диаметр	0,25 – 1,2 мм	13 – 15 мкм	10 – 25 мкм	13 – 17 мкм
Температура плавления, С°	1550	860	160	1450
Стойкость к коррозии и щелочам	Низкий показатель	Только для щелочестойкой фибры	Высокий показатель	Высокий показатель

Сравнительные механические характеристики различного вида волокон, применяемых в строительстве, представлены в таблице 1.3 [37].

Таблица 1.3 – Физико – механические характеристики различных видов фиброволокон, используемых для изготовления дисперсно – армированных бетонов

Вид фиброволокна	Показатель плотности, г/см <sup>3</sup>	Характеристики модуля упругости, МПа	Показатель прочности на растяжение, МПа	Процент удлинения при разрыве, %
1 Стальная фибра	7,80	190000 – 210000	600 – 3150	3,0 – 4,0
2 Стекловолоконная фибра	2,60	7000 – 8000	1800 – 3850	1,5 – 3,5
3 Базальтовая фибра	2,6 – 2,7	7000 – 11000	1600 – 3200	1,4 – 3,6
4 Синтетическая полипропиленовая фибра	0,9	3500 – 8000	400 – 700	10 – 25
5 Акриловая фибра	1,1	2100 – 2150	210 – 420	25 – 45
6 Полиэтиленовая фибра	0,95	1400 – 4200	600 – 720	10 – 12
7 Нейлоновая фибра	1,1	4200 – 4500	770 – 840	16 – 20
8 Вискозная сверхпрочная	1,2	5600 – 5800	660 – 700	14 – 16
9 Полиэфирная фибра	1,4	8400 – 8600	730 – 780	11 – 13
10 Хлопковая фибра	1,5	4900 – 5100	420 – 700	3,0 – 10
11 Карбоновая фибра	1,63	280000 – 380000	1200 – 4000	2,0 – 2,2
12 Углеродная фибра	2,0	200000 – 250000	2000 – 3500	1,0 – 1,6
13 Асбестовая фибра	2,6	68000 – 70000	910 – 3100	0,6 – 0,7

Геометрические параметры используемой фибры, ее количество в бетонной смеси, дисперсность минеральных компонентов в матрице – все это способствует повышению степени сопротивления динамическим воздействиям. Также как ударостойкость бетона, при дисперсном армировании, возрастает независимо от показателя средней плотности матрицы и различного вида применяемого фиброволокна.

Характеристика объемного процента армирования в пределах от 1,5 – 3,0 %, при дисперсном армировании полимерными волокнами мелкозернистых бетонов показывает, что показатель эффективности таких фибробетонов не менее чем в сталефибробетонах. При увеличении относительной длины фиброволокна возрастает ударная стойкость. Повышая концентрацию дисперсного волокна в бетонные смеси до 5 – 10 % показатель модуля упругости растет, что обеспечивает высокую ударостойкость фибробетона [29].



В работе [37], написанной Соловьевым В.Г. и Шуваловой Е.А. описываются результаты влияния различных видов неметаллических фиброволокон на трещиностойкость фибробетонов. На основании результатов исследований данных ученых установлено, что наиболее эффективным является композитное стеклопластиковое фиброволокно, широко представленное на рынке, для производства бетонных конструкций (рисунок 1.1).

Данное фиброволокно, «при оптимальных дозировках, позволяет получить фибробетоны с фактическим классом по остаточной прочности в пределах 50% от фактического класса по прочности на растяжение при изгибе, а применение полимерной микро и макрофибры – только 30 %» [37].

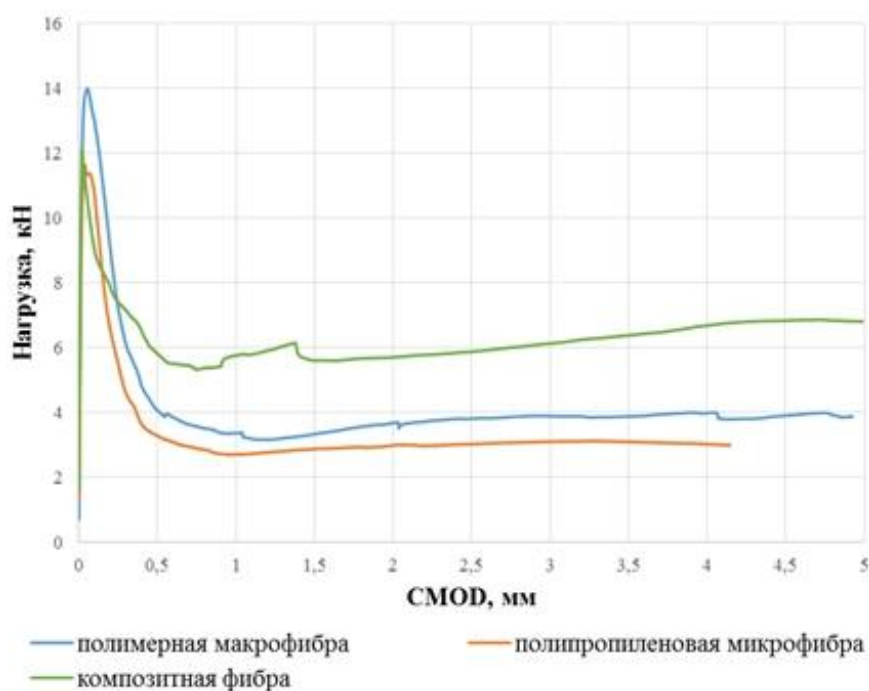


Рисунок 1.1 – Графики «нагрузка – СМОД» испытаний фибробетона

Многообразие указанных видов фибровых волокон является достаточным для формирования широкого спектра дисперсно армированных бетонов разного состава, плотности и прочностных характеристик, что способствует достаточно масштабной и объективной оценке влияния на физико – механические свойства и долговечность получаемых фибробетонов [30].

### **1.3 Оценка возможности применения отходов производства в качестве армирующего волокна для изготовления фибробетонов**

Некоторые исследователи, в частности Соломатов В.И, считают фибробетон материалом типа «структура в структуре», обладающим сложной полиструктурной организацией и выделяют в нем два масштабных уровня:

1) микроскопический уровень – уровень цементного камня, устанавливающий фазовый состав новых образований, виды и характер пористости;

2) макроскопический уровень – уровень бетона, устанавливающий вид и свойства цементного камня, заполнителя, фиброволокна и соотношение между ними, однородность распределения фибры в объеме фибробетона.

При повышении технико – экономического эффекта и универсальности бетонных материалов предусматривают как усовершенствование характеристик бетона, так и развитие производства модернизированных конструкционных материалов, к которым относятся дисперсно – армированные бетоны с воедино собранными лучшими качествами различных составляющих.

Механические свойства фибробетонов наиболее полно отражают их прочностные и деформативные характеристики.

Особенность формирования контактов между фиброволокном и цементным тестом характеризуется наличием капиллярных сил поверхностного натяжения, это способствует прилипанию к поверхности фибровых волокон за счет микрочастиц, имеющих размер от нескольких микрон до 1 – 2 мм. Благодаря капиллярному сцеплению создаются структурные элементы, упрочняющиеся в процессе тепловой обработки из-за стесненных условий твердения – это приводит к изменению структуры матрицы композита [28].

На рисунке 1.1 представлена структура фибробетона.

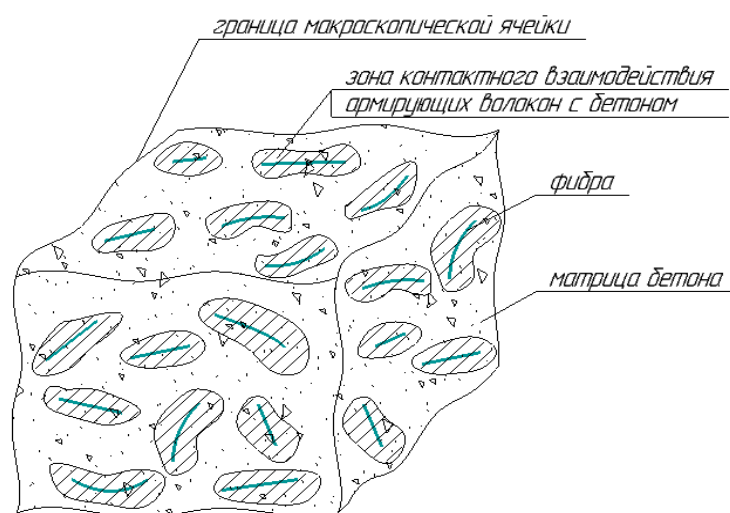


Рисунок 1.1. – Структура фибробетона

Фиброволокно снижает показатель суммарной проницаемости бетона при уменьшении диаметра пор (средних и максимальных), это улучшает его сопротивляемость к агрессивным средам. Также фибровая арматура способствует повышению сопротивляемости бетона при многократном, длительном нагружении и при добавлении аморфной металлической фибры происходит увеличение прочности на сжатие, раскалывание, срез и изгиб [33].

По данным, приведенным в отечественной и иностранной литературе [34, 36], установлено, что с помощью дисперсного армирования, независимо от вида фибры, добиваются повышения ударостойкости бетона в несколько раз. Также считается, что показатель повышения сопротивления ударным воздействиям зависит от геометрических размеров применяемого фиброволокна, процента армирования и технологии изготовления конструкции [34].

Характеристики влияния фиброволокна на ударостойкость приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Количество фибрового волокна и его влияние на ударную стойкость фибробетонов

Вид фиброволокна	Показатель объемного процента армирования	Размер фиброволокна	Ударостойкость, Дж/см	Коэффициент эффективности
Бетон без фибры	–	–	10,0	1,0
Комплексные капроновые нити, отрезки	0,1	10×0,02	11,5	1,1
	0,92		30,0	3,0
	1,84		52,0	5,2
	2,8		65,0	6,5
	3,7		74,0	7,4
Комплексные капроновые нити, отрезки	0,1	20×0,2	12,0	1,2
	0,92		48,0	4,8
	1,84		75,0	7,5
	2,8		95,0	9,5
	3,7		87,0	8,7
Стальное фрезерованное фиброволокно (волокнистые анкеры по длине)	2,92	36×0,6	97,5	9,8
Стальное фиброволокно из проволоки (круглое сечение, волокнистые анкеры по длине)	1,35	50×0,5	70,0	7,0
Стальное токарное фиброволокно	5,07	11×0,16	261,0	26,1

Характеристики механических свойств фибробетонов позволяют применять его для конструкций, подвергающимся динамическим воздействиям. Также дисперсно – армированный бетон пригоден для производства тонкостенных конструкций с достаточно высокой долговечностью [29].

В дисперсно – армированных бетонах восприятие растягивающих волокон принимает на себя фиброволокно, за счет этого усиливаются углы и торцы фибробетонных конструкций, способствует снижению усадки и повышению трещиностойкости. Также помогает приобрести бетону дополнительную жесткость и увеличить прочностные характеристики, это дает возможность разрабатывать конструкции, способные выдерживать высокие нагрузки [31].

Свойства бетона зависят от длины и отношения длины к диаметру фиброволокон. По теории длинные фиброволокна с большим отношением длины к диаметру лучше, чем короткие. С увеличением длины фибры, возрастает влияние на прочностные показатели бетона в целом. Однако при длинных волокнах ухудшаются условия приготовления фибробетона так как они хуже распределяются в бетоне. В связи с этим должно соблюдаться условие – длина волокна должна превосходить двойной диаметр наиболее крупного заполнителя [26].

В данной работе рассматриваются самоуплотняющиеся и мелкозернистые фибробетоны на основе металлической, полипропиленовой фибры и отходов производства.

Самоуплотняющиеся бетоны имеют способность заполнять форму даже в густоармированных конструкциях и уплотняются под воздействием собственного веса, без применения виброуплотнения. Данный вид бетона сокращает время строительства, при обеспечении высокого качества поверхности изделий, снижении уровня шума и дополнительной обработки.

Область применения самоуплотняющихся бетонов: высотное строительство; реставрация и усиление конструкций; производство сборного железобетона и др.

Основное отличие мелкозернистых бетонов от обычных марок бетонов – ограничение размеров зерен компонентов, по верхнему пределу размер заполнителя составляет 3 – 5 мм. Мелкозернистые бетоны имеют однородную структуру и их относят к группе тяжелых бетонов. Достижение прочностных характеристик осуществляется за счет применения цемента высоких марок, не ниже М400, минимального водоцементного отношения, добавления специальных примесей. Плотность зерен должна быть в пределах  $2000 - 2800 \text{ г/см}^3$ , а доля цемента не должна превышать  $750 \text{ кг/м}^3$ , согласно стандартам. Уменьшение цемента ведет к потере прочностных характеристик, а увеличение приводит удорожанию смеси и большей

потребности в объеме воды для затворения, что отрицательно сказывается на рабочих характеристиках и приводит к излишней пористости.

Применение таких бетонов при производстве конструкций должно быть экономически обосновано.

Для этого необходимо исследовать основные закономерности и процессы образования структуры фибробетонов на основе фиброволокна из отходов производства, разработать состав фибробетона с включением данных отходов, определить их физико-механические характеристики и получить составы, имеющие массовый спрос и потребление на строительном рынке, за счет высокой гомогенизации компонентов смеси.

Наиболее распространенным вяжущим для изготовления мелкозернистых и самоуплотняющихся фибробетонов является портландцемент. Его основным компонентом жидкой фазы в процессе твердения, влияющим на фиброволокна, является гидроксид кальция [18].

Наилучшие результаты по прочности на сжатие показывают цементы с повышенным содержанием  $C_3S$  (не менее 50%) [15].

Одним из условий получения таких фибробетонов с высокими физико-механическими характеристиками является отказ от крупного заполнителя, а мелкий заполнитель должен иметь прерывистый зерновой состав [18]. При этом должен соблюдаться такой гранулометрический состав заполнителя, который обеспечит упаковку всех компонентов зернистого каркаса бетонной смеси. Данный состав характеризует равномерное распределение волокон, чем смесь на крупном заполнителе.

Показатели качества фибробетонов зависят от структуры и формы зерен, плотности, твердости и прочности, зависят как от химического состава, так и от минералогического состава заполнителя [22].

Перспектива и эффективность совершенствования структуры фибробетонов заключается в широком использовании различных органических и неорганических добавок. Модифицирующие добавки влияют на процессы гидратации и кристаллизации, т. е. на структуру твердого

цементного камня и изменяют свойства бетона. Номенклатура применяемых добавок очень обширна.

Наиболее распространенными считаются зола – уноса, микрокремнезем, метакаолин, связывающие гидрат окиси кальция в гидросиликаты кальция в процессе твердения цемента. За счет этого значительно повышается прочность и долговечность бетонов.

Использование данных добавок эффективно в комплексе с гиперпластификаторами и фиброволокнами.

Таким образом, считается целесообразным проведение экспериментальных исследований свойств самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов, армированных металлическими, полипропиленовыми волокнами, а так же отходами производства, основных закономерностей и процессов образования структуры фибробетонов на их основе. Наряду с этим высокоэффективным считается разработка состава фибробетона с включением отходов производства, имеющего высокие физико – механические характеристики, и получение состава, имеющего массовый спрос и потребление на строительном рынке, за счет высокой гомогенизации компонентов смеси.

Выводы по первой главе.

В настоящее время дальнейшее совершенствование технологий дисперсно – армированных бетонов допустимо за счет развития номенклатуры композитного фиброволокна различного вида и свойств, обладающими рядом значимых преимуществ, позволяющих найти сферы нового применения при производстве конструкций и изделий.

Экономическая эффективность применения конструкций из фибробетона достигается благодаря улучшенным свойствам, которые приобретают конструкции с внедрением в нее фиброволокна, а также путем изменения технологий производства и возведения. Это способствует увеличению срока службы конструкций и снижению затрат на функционирование конструкций на протяжении определенного срока.

Таким образом, подтверждение целесообразности использования дисперсно – армированных конструкций исходит из правильного понимания работы конструкций под нагрузками, оценки модернизированных свойств после внедрения фиброволокна различного вида и исходит из опыта производства и эксплуатационных параметров конструкций.

Анализ данных в соответствии с технической литературой и данных, полученных в результате проведения собственных предварительных экспериментов, дает возможность формулировки следующих выводов и результатов исследования:

- недостатками бетонов являются низкий показатель прочности на растяжение и трещиностойкость, что приводит к хрупкому разрушению конструкций под нагрузками;

- дисперсное армирование фиброволокнами различного вида и размеров способствует улучшению характеристик прочности и деформации.



## **2 Характеристика применяемых материалов для исследования и методы испытаний**

### **2.1 Свойства и характеристики применяемых для производства фибробетонов материалов**

Исследования экспериментальной части проводились в лаборатории кафедры «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство» Архитектурно – строительного института. В работе применялись различные методы исследования материалов и фибробетонов в соответствии с требованиями действующих государственных стандартов.

При выполнении экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

1) Портландцемент:

а) При проведении исследований в качестве вяжущего был использован портландцемент «Мордовцемент» тип ЦЕМ I с классом прочности 42,5Б (М500-Д0).

Данный цемент является быстротвердеющим цементом общестроительного назначения ПЦ–500 Д0 и обладает повышенной прочностью конечной конструкции, составляющую 500 кг на 1 см<sup>2</sup>.

Отличительной чертой портландцемента «Мордовцемент» ЦЕМ I 42,5Б является:

- сроки схватывания составляют  $\geq 60$  и  $\leq 160$  минут с момента приготовления рабочей смеси;
- добавки в цементе ПЦ–500 Д0 отсутствуют;
- экологически безопасен;
- цемент ПЦ–500 Д0 используется в смеси со строительным песком.
- рекомендуется соотношение ц/п 1:3, смесь песка с ц/в 5:2;
- при хранении в сухом помещении, при температуре выше +5 С°, сохраняет свои характеристики до 90 суток со дня изготовления.

Характеристики портландцемента «Мордовцемент» ЦЕМ I 42,5Б  
приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристика портландцемента «Мордовцемент» ЦЕМ I 42,5Б

Наименование характеристики	Ед. изм.	Портландцемент с добавками
Прочность (возраст 2 суток)	МПа	
- изгиб		4,55 ± 0,2
- сжатие		22,0 ± 2,0
Прочность (возраст 28 суток)	МПа	
- изгиб		8,7 ± 0,3
- сжатие		51,0 ± 2,0
Удельная поверхность	м <sup>2</sup> /кг	350 ± 20
Массовая доля вспомогательного компонента (опока)	%	4,0 ± 1,0
Содержание оксида серы (VI) SO <sub>3</sub>	%	3,5 ± 0,5
Нормальная плотность цементного теста	%	27,0 ± 1,0
Сроки схватывания	час:мин	
- начало		2:40 ± 0:20
- конец		3:5 0± 0:20

б) Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н, использованный в исследованиях, является нормальнотвердеющим с классом прочности 42,5, содержит до 5 % известняка в качестве вспомогательного компонента. Известняк натурального происхождения, т.е. инертная минеральная добавка – наполнитель к цементу, улучшающая структуру цементного камня и реологические свойства цемента.

Отличительной чертой портландцемента «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н является:

– низкое содержание СГ примерно 0,01%, по отношению к норме 0,1%. Это способствует увеличению срока эксплуатации за счет уменьшения коррозии арматуры в бетоне;

– низкое содержание щелочей R<sub>2</sub>O примерно от 0,4% до 0,5%, увеличивается стойкость трещинообразованию;

– оптимальное содержание С<sub>3</sub>А от 7% до 7,5%;

– нормальная плотность от 25% до 26%;

– средняя тонкость помола по Блейну 3440 см<sup>2</sup>/г.

Минералогический состав клинкера для производства портландцемента «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н:

- C<sub>3</sub>A – 7,5%;
- C<sub>3</sub>S – 58,0%;
- C<sub>3</sub>A + C<sub>4</sub>AF – 20,0%;
- R<sub>2</sub>O – 0,4%.

Характеристики портландцемента «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристика портландцемента «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н

Наименование характеристики	Портландцемент с добавками
Класс по прочности при сжатии, 28 суток	42,5
Подкласс по прочности на сжатие, 2 - 7 сутки	Нормальнотвердеющий
Нормативный документ	ГОСТ 31108-2003
Прочность на сжатие в возрасте 2 суток, не менее (МПа)	10
Прочность на сжатие в возрасте 7 суток, не менее (МПа)	не нормируется
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, не менее (МПа)	42,5
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, не более (МПа)	62,5
Начало схватывания, (мин) не ранее	60

2) Заполнители:

В качестве мелкого заполнителя в исследованиях фибробетонов использовались мелкий песок Волжского месторождения и крупный песок Камского месторождения.

а) Волжский речной песок по ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ».

Характеристики речного Волжского песка приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики речного Волжского песка

Наименование характеристики	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Модуль крупности	М кр.	мм	1,33
Содержание пылевидных и глинистых частиц	СПиГЧ	%	0,7

Содержание пылевидных и глинистых частиц в песке Волжского месторождения – 0,7 % по массе (норматив по ГОСТ 8736-2014 до 6%). Глина в комках отсутствует.

б) Крупный песок Камского месторождения с модулем крупности

$M_{кр.} = 3,53$  по ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ».

Гранулометрический состав речного Волжского песка и песка Камского месторождения представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Гранулометрический состав речного Волжского песка и Камского песка

Наименование показателя	Ед. изм.	Вид песка	
		Речной Волжский	Камский
Насыпная плотность	кг/м <sup>3</sup>	1470	1562
Гранулометрический состав, мм:		Остатки (%) на ситах (частные/ полные)	
5	%	-	$\frac{8,0}{8,0}$
2,5		$\frac{0,4}{0,4}$	$\frac{31,0}{39,0}$
1,25		$\frac{0,4}{0,8}$	$\frac{19,0}{58,0}$
0,63		$\frac{1,2}{2,0}$	$\frac{16,9}{74,9}$
0,315		$\frac{30,0}{32,0}$	$\frac{17,4}{92,3}$
0,16		$\frac{66,0}{98,0}$	$\frac{6,9}{99,2}$
< 0,16		$\frac{2,0}{100}$	$\frac{0,8}{100}$
Модуль крупности, $M_{кр.}$		мм	1,33

Согласно таблице 1 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» речной песок Волжского месторождения по значению модуля крупности относится к группе песка «очень мелкий», песок Камского месторождения – «повышенной крупности». Полный остаток в процентах по массе на сите № 0,63 составляет:

- песок Волжского месторождения – 2%;
- песок Камского месторождения – 74,9%;

что соответствует значениям, указанным в таблице 2 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Песок Камского месторождения с группой песка «повышенной крупности» относится к II классу песка согласно ГОСТ 8736-2014 и ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».

в) В качестве крупного заполнителя для изготовления фибробетонов был использован щебень из гранодиоритов.

Щебень из плотных горных пород – гранодиоритов с фракцией 5 – 10 мм по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». Технические характеристики щебня из гранодиоритов Гумбейского щебеночного комплекса, расположенного на территории Агаповского района Челябинской области, представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики щебня из гранодиоритов

Наименование технической характеристики	Значение технической характеристики
Марка по дробимости	M1400
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы	I группа (до 10%)
Марка по истираемости	И1
Насыпная плотность	1470 кг/м <sup>3</sup>
Морозостойкость	F300
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов	Менее 370 Бк/кг, 1 класс для любых видов строительства

Отсутствует содержание глины в комках, зерен слабых пород и вредных примесей.

Химический состав щебня приведен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Химический состав щебня из гранодиоритов

Химический элемент						
SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Содержание в %						
61,07	5,90	17,23	9,13	3,44	0,66	0,30

### 3) Фиброволокно.

Для дисперсного армирования бетонов применялись следующие виды фиброволокна:

а) Фибра волнового профиля ФСВ-В-0,3/15 Белорусского металлургического завода – управляющей компанией холдинга «Белорусская металлургическая компания» в соответствии с ТУ 1221-001-71968828-2005 «Фибра из стальной проволоки для армирования бетона».

Характеристики фибры волнового профиля приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Характеристики фибры волнового профиля ФСВ-В-0,3/15

Наименование характеристики	Значение	Отклонение	Ед.изм.
Диаметр	0,3	$\pm 0,05$	мм
Длина	15	$\pm 5$	мм
Ширина шага гофры	4 -5	-	шт

Металлическая фибра волнового профиля ФСВ-В-0,3/15 представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Фибра волнового профиля

б) Волокно полипропиленовое микроармирующее длиной  $L = 12$  мм, ООО «Фибраснаб» города Екатеринбург.

Волокно изготовлено из высокомолекулярного модифицированного полимера, диаметром 20 – 25 мкм. Прочность на разрыв не менее 450 Мпа, модуль упругости не менее 5100 Мпа и температура плавления 160 °С.

Данная полипропиленовая фибра: предотвращает появление усадочных трещин; существенно увеличивает ударную прочность, геометрическую точность и качество поверхностей изделий; снижает брак; повышает устойчивость к истиранию и пылению; повышает морозостойкость и водонепроницаемость; повышает прочность на сжатие и растяжение при изгибе; увеличивает адгезионные свойства; повышает пластические свойства.

Полипропиленовое волокно производства ООО «Фибраснаб» представлено на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Волокно полипропиленовое микроармирующее длиной  $L=12$ , ООО «Фибраснаб»

в) Отходы производства «КуйбышевАзот» - полиамидные волокна.

Полиамидная нить производства ОАО «КуйбышевАзот» - низко модульные волокна с характерным для них большим относительным удлинением при разрыве диаметром 0,8 мм и длиной  $L = 10$  мм. Плотность волокна  $0,9 \text{ см}^3$ , прочность на растяжение не менее 720 МПа, модуль упругости 5000 МПа.

Характерными чертами таких волокон являются прочность, жесткость, эластичность, что характерно для армирования тонких элементов на основе минеральных вяжущих веществ. Полиамидная фибра устойчива к щелочным средам и обычным растворителям, способствует хорошему сопротивлению к

истиранию, улучшает капиллярную упаковку, что ведет к уменьшению объема воды, поглощаемой бетоном, температура плавления составляет 250 °С.

Полиамидное волокно производства ОАО «КуйбышевАзот» представлено на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Полиамидное волокно (отход производства «КуйбышевАзот»)

4) Гиперпластификатор «STACHEMENT 2280» на основе поликарбоксилатов.

Является высокоэффективным жидким, готовым к применению, гиперпластификатором. Данный гиперпластификатор изготовлен на основе поликарбоксилатов. Относится к разряду «быстрых» гиперпластификаторов, так как обладает ускоряющим эффектом и способствует быстрому набору прочности бетона. Продукт не горюч и физиологически безвредный. Жидкость красно – коричневая с плотностью при 20 °С –  $1,065 \pm 0,030$  г/мл. pH – 7 – 10.

«STACHEMENT 2280» применяется для снижения дозировки цемента, что является целевой функцией задачи оптимизации состава фибробетонной смеси. Следует отметить, что применение данного гиперпластификатора



важно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения повышения характеристик фибробетона.

Достоинства гиперпластификатора «STACHEMENT 2280»:

- экономия цемента и снижение себестоимости бетона;
- повышение ранней и финальной прочности, водонепроницаемости и долговечности бетона;
- повышение стойкости бетона к климатическим и химическим воздействиям;
- снижение количества воды затворения;
- экономия энергии при обработке бетонной смеси;
- экономия времени и тепловой энергии при термической обработке бетона;
- препятствует вовлечению лишнего воздуха в бетон;
- даёт бетонной поверхности качественный вид, не меняет цвет бетона и не создаёт выцветы;
- повышает оборачиваемость опалубки;
- подходит для армированных конструкций, так как не содержит хлоридов.

#### 5) Наполнитель цемента.

Наполнители цемента оказывают большое влияние на пластичность и водоудерживающую способность бетонной смеси. Зерна наполнителя участвуют в процессе формирования кристаллической структуры цементного камня. Введение наполнителя способствует ускорению процесса гидратации цементных зерен.

В качестве наполнителя в исследованиях использовался микрокремнезем.

Микрокремнезем – мелкие шарообразные частицы аморфного кремнезема. Средняя удельная поверхность составляет  $20\text{ м}^2/\text{г}$ , гранулометрический состав составляет 0,1 микрона, что в 100 раз меньше среднего размера зерна цемента.

Частицы микрокремнезема имеют сферическую форму и гладкую поверхность. Диоксид кремния в аморфной форме - основной компонент отхода.

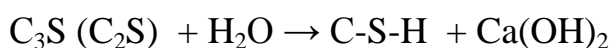
Химический состав микрокремнезема представлен в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Химический состав микрокремнезема

Химический элемент								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	S
Содержание в %								
90 - 92	0,68	0,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

Значение показателя рН водной суспензии микрокремнезема составляет в среднем – 7,74.

Микрокремнезем способствует уменьшению расхода цемента до 200 – 450 кг/м<sup>3</sup>, обладает высокой прочностью на сжатие 60 – 80 МПа и выше 80 МПа для мелкозернистых бетонов, повышает антикоррозионную стойкость, снижает водонепроницаемость на 50%, что повышает долговечность. Микрокремнезем как и все пуццолановые материалы, вступает в реакцию с гидроксидом кальция Ca(OH)<sub>2</sub>, образующейся при гидратации клинкерных минералов цемента с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция с соотношением CaO / SiO<sub>2</sub> – 0,9 – 1,3:



Высокая чистота и повышенная дисперсность микрокремнезема способствует более эффективной и быстрой реакции.

б) Вода использовалась в соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

## 2.2 Применяемое оборудование

В ходе экспериментального диссертационного исследования применялись следующие приборы, инструменты и оборудования:

1. Для изучения физико – механических свойств и освоения метода определения качественных показателей щебня использовались следующие

приборы, инструменты и оборудования: весы с разновесами; мерные цилиндры; набор стандартных сит; штангенциркуль; пресс гидравлический; металлические линейки; цилиндры диаметром 75 и 150 мм.

2. При проведении испытаний песка в соответствии с требованиями ГОСТов к пескам, применяемых в качестве заполнителей растворов и бетонов, использовались следующие приборы, инструменты и оборудования: набор стандартных сит; сосуд вместимостью 1 дм<sup>3</sup>; совок; весы торговые с набором гирь; мензурка вместимостью 100 – 500 см<sup>3</sup>;

3. Для расчета соотношения цемента, воды, песка и заполнителя для получения фибробетонной смеси с заданной удобоукладываемостью и исследования свойств фибробетонов применялись следующие приборы, инструменты и оборудование: боек для приготовления бетонной смеси; две лопаты; стандартный конус; штыковка; форма на три образца – куба 70x70x70 мм; форма на три образца – призмы размером 40x40x160 мм; виброплощадка; встряхивающий столик; весы; пресс гидравлический; камера для выдерживания фибробетонных образцов в нормальных условиях твердения.

### **2.3 Технология изготовления образцов**

В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый самоуплотняющийся бетон, который позволил обеспечить высокую степень насыщения волокнами и высокую дисперсность армирования.

При приготовлении фибробетонной смеси был определен расход материалов на каждый замес объемом необходимым для изготовления образцов – кубов и образцов – призм определенного количества.

Количество сухих материалов (портландцемент, заполнители, микрокремнезем, фиброволокно), рассчитанных на замес, взвешивали на весах с погрешностью  $\pm 1$  г. С такой же погрешностью отмеряли воду мерным цилиндром.

Заполнитель, цемент и фиброволокно смешивали в сухом состоянии до получения гомогенной смеси, затворяли необходимым количеством воды и перемешивали до образования однородной массы.

До испытания в возрасте 7, 14 и 28 суток образцы выдерживали в нормальных условиях твердения.

#### **2.4 Методы испытаний исходных материалов и фибробетонов**

В ходе выполнения диссертационной работы использовались стандартные методы испытаний и исследований сырьевых материалов и изделий на их основе.

Песок, в качестве мелкого заполнителя для фибробетона, исследовался в соответствии с ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Щебень из гранодиоритов испытывался в соответствии с ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ Методы физико – механических испытаний».

Приготовление фибробетонных смесей осуществлялось согласно ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия», ГОСТ 12730.0-78 «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости» и ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования».

Производились испытания прочности образцов на сжатие и растяжение при изгибе в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

### **3 Исследование основных закономерностей и процессов образования структуры фибробетона с использованием фибры различного вида**

В данной диссертационной работе исследовались физико – механические свойства мелкозернистого фибробетона с использованием металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства «КуйбышевАзот» – полиамидных волокон в зависимости от состава бетонной смеси и степени армирования.

#### **3.1 Исследование свойств бетона с металлическими армирующими волокнами**

С целью изучения фибробетона с использованием металлического фиброволокна были изготовлены фибробетонные образцы I серии размером 70x70x70 мм и 40x40x160 мм.

В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый самоуплотняющийся бетон. Все образцы I серии имели одинаковый состав матрицы: Ц : П = 1:1,39 при В : Ц = 0,5.

Для изготовления фибробетонных образцов партий 1,3,4,5,6,7,15 и 16, были использованы портландцемент «Мордовцемент» ЦЕМ 42,5 Б, природный песок Волжского месторождения с модулем крупности  $M_{кр} = 1,3$ , металлическая фибра. Металлическое фиброволокно вводилось в состав бетонной смеси в количестве 34 (1,6), 51 (2,3), 69 (3,1), 84 (3,9), 104 (4,6), 133 (6,0), 166 (7,4) кг/м<sup>3</sup> (% от массы бетонной смеси). Распływ фибробетонной смеси определяли путем измерения величины расплыва на встряхивающем столе.

Составы фибробетонных смесей с металлической фиброй приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Составы фибробетонной смеси с металлической фиброй

Состав	№ партии							
	8	3	4	1	6	7	15	16
Ц : П=1:1,39								
Единица измерения	Кг/м <sup>3</sup>							
Цемент «Мордов цемент» 42,5 Б	757	735	737	738	723	749	718	716
Песок «Волжский»	1051	1021	1024	1025	1004	1040	997	996
Вода	379	367	369	369	361	375	359	358
Фибра металлическая	-	34	51	69	84	104	133	166
В/Ц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2187	2157	2181	2201	2172	2268	2207	2236
Расплав конуса, см	64	66	64	62	68	60	78	76

Технология приготовления бетонной смеси осуществлялась путем тщательного перемешивания компонентов бетонной смеси в сухом виде, с целью равномерного распределения фиброволокна, после чего добавляли воду и вновь перемешивали.

При приготовлении бетонной смеси с металлической фиброй возникали трудности. В процессе перемешивания сухих компонентов бетонной смеси металлическая фибра комковалась, что в результате приводило к неравномерному распределению фибры в объеме бетонной смеси, что проиллюстрировано на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Приготовление бетонной смеси с металлической фиброй

Изготовленные фибробетонные образцы – кубы размером 70x70x70 мм и образцы – призмы размером 40x40x160 мм с разным количеством металлического фиброволокна перед испытаниями выдерживались в течение 7, 14 и 28 суток в нормальных условиях твердения.

Испытания образцов на прочность выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 50т.

Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии представлены в таблице 3.2 и на рисунках 3.2, 3.3.

Таблица 3.2 – Пределы прочности при сжатии образцов фибробетона с металлической фиброй

Возраст образцов	№ партии							
	8	3	4	1	6	7	15	16
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>							
	0	34	51	69	84	104	133	166
Предел прочности при сжатии, МПа								
7 суток	29,5	27,2	26,0	29,1	26,7	30,3	29,2	29,7
14 суток	31,2	35,0	34,2	35,3	34,0	35,5	35,8	36,5
28 суток	38,7	42,5	39,9	39,2	37,6	38,8	38,5	39,4

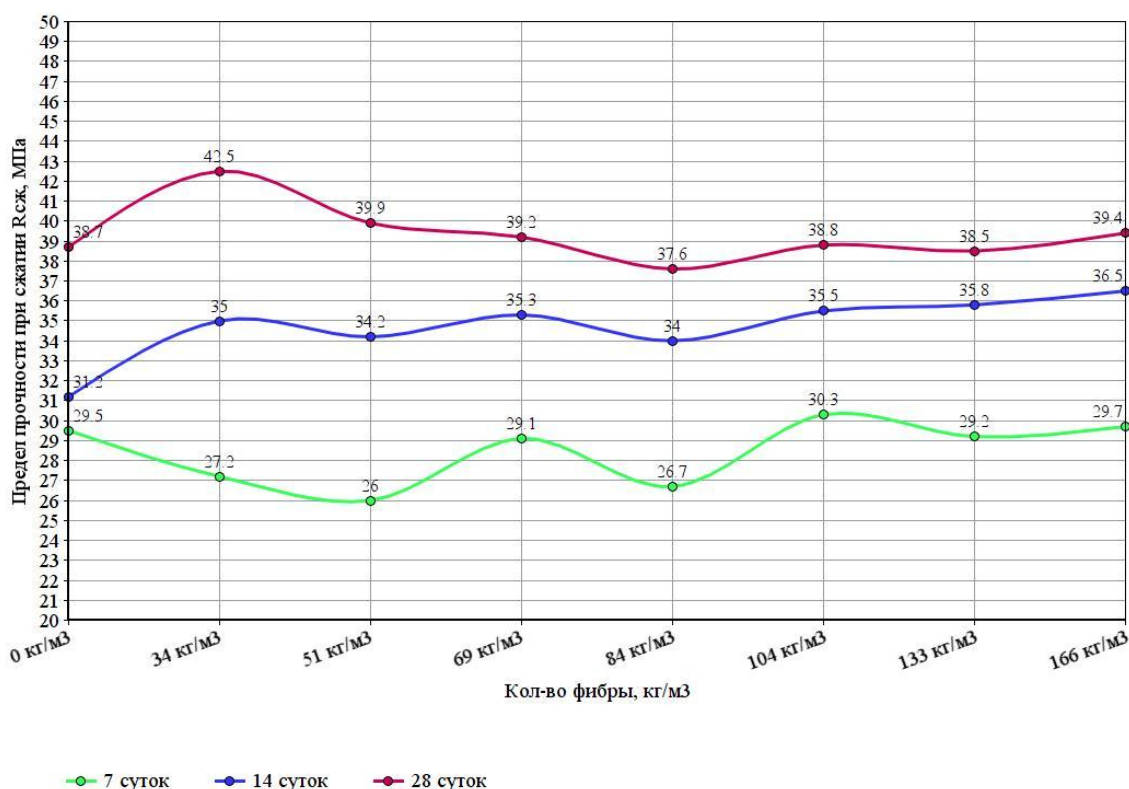


Рисунок 3.2 – Предел прочности фибробетона при сжатии от степени армирования металлическим фиброволокном

Результаты исследований (рисунок 3.2 и 3.3) показывают, что наилучшие прочностные характеристики в возрасте 28 суток имеют образцы мелкозернистого фибробетона с армированием металлической фиброй в

количестве 34 кг/м<sup>3</sup>. С увеличением количества фибры до 84 кг/м<sup>3</sup> наблюдается плавное снижение прочности на 15% по сравнению с прочностью образцов с содержанием металлической фибры 34 кг/м<sup>3</sup>. При повышении армирования до 104 кг/м<sup>3</sup> фибры и более прочность образцов фибробетона начинает возрастать, при содержании фибры в бетоне в количестве 166 кг/м<sup>3</sup> прочность образцов фибробетона достигает 39,4 МПа.

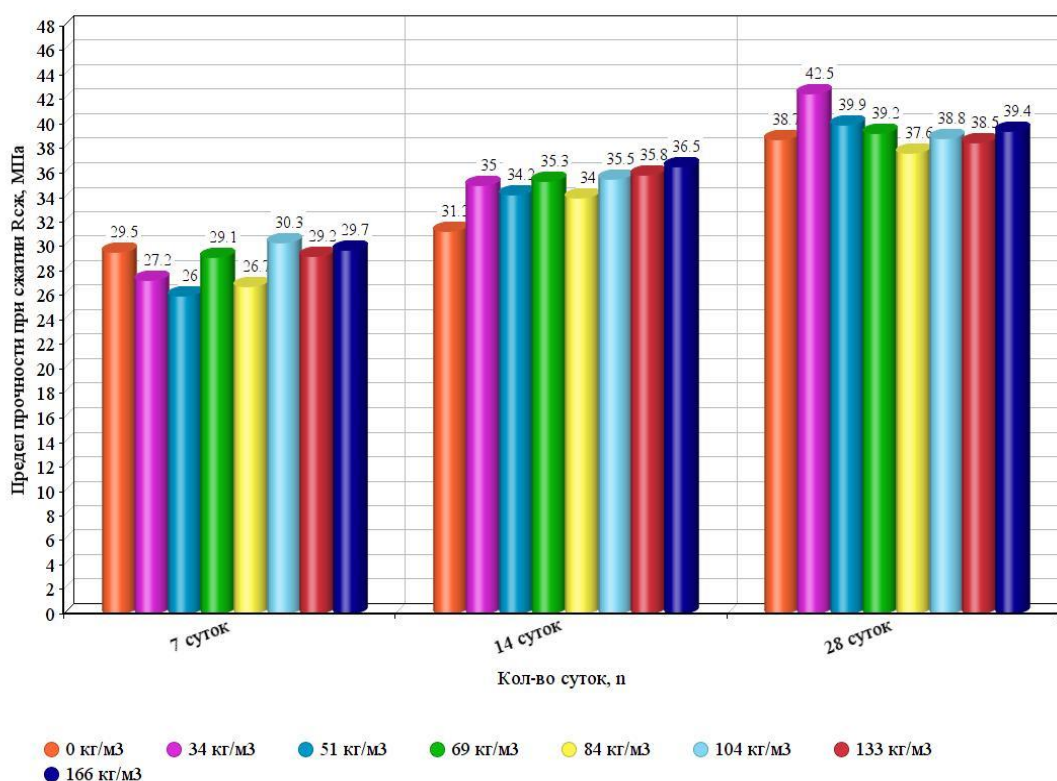


Рисунок 3.3 – Зависимость прочности фибробетона при сжатии от количества в бетонной смеси металлической фибры

Испытания предела прочности фибробетонных образцов на растяжение при изгибе производились согласно ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Установка для испытания образцов – призм представлена на рисунке 3.4.

Все фибробетонные образцы изготавливались при постоянном водоцементном отношении 0,5. Наибольшую прочность при таких условиях формирования показал состав с 1,6% содержанием металлического волокна от массы бетонной смеси. Прочность фибробетона в 28 суток состава партии №3 с 1,6% содержанием волокна составила 42,5 МПа, что превосходит



прочность бетона контрольной партии №8 без волокна на 9% в соответствующие сроки твердения.



Рисунок 3.4 – Установка для испытания образцов фибробетонной смеси на изгиб

Результаты испытаний фибробетонных образцов на изгиб с металлической фиброй представлены в таблице 3.3 и на рисунках 3.5, 3.6.

Таблица 3.3 – Пределы прочности при изгибе фибробетонных образцов с металлической фиброй

Возраст образцов	№ партии							
	8	3	4	1	6	7	15	16
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>							
	0	34	51	69	84	104	133	166
	Предел прочности при изгибе, МПа							
28 суток	5,8	6,5	6,0	6,2	5,6	6,2	5,8	5,9

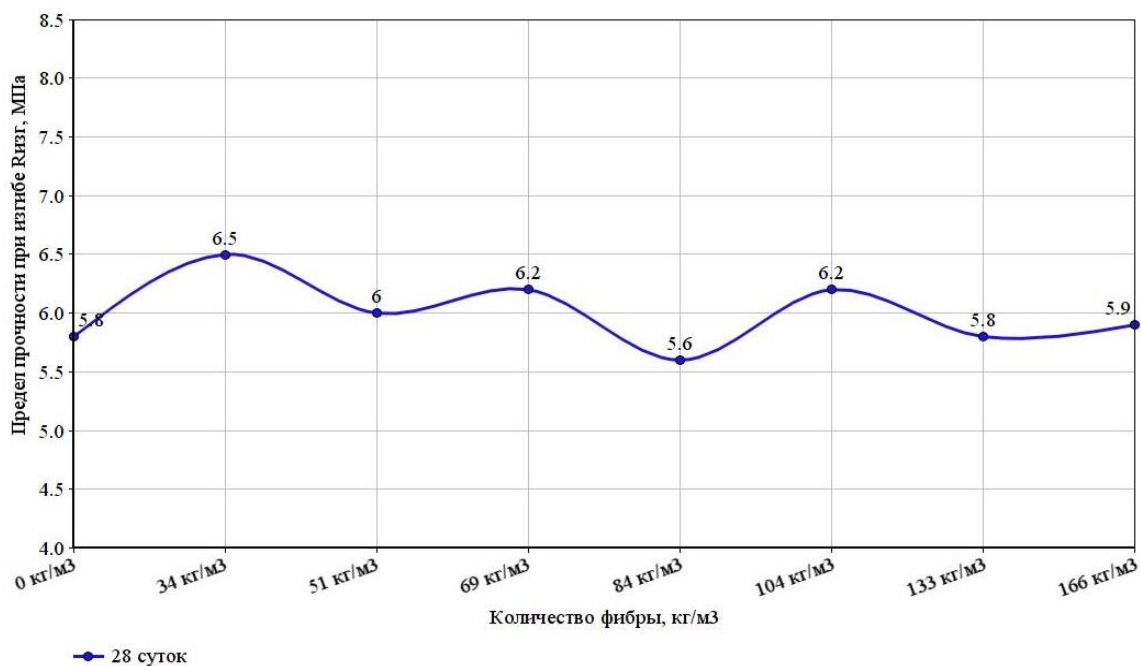


Рисунок 3.5 – Предел прочности фибробетона при изгибе от степени армирования металлическим фиброволокном

Кривая зависимости предела прочности при изгибе  $R_{изг}$ . (рисунок 3.5) от степени армирования металлическим фиброволокном аналогична кривой зависимости предела прочности при сжатии  $R_{сж}$ . (рисунок 3.2). Наилучшие прочностные характеристики предела прочности при изгибе имеют образцы мелкозернистого фибробетона с армирование металлической фиброй в количестве  $34 \text{ кг/м}^3$ . С увеличение количества фиброволокна до  $84 \text{ кг/м}^3$  наблюдается плавное снижение прочности на 14 % по сравнению с прочностью фибробетонных образцов с содержанием металлической фибры  $34 \text{ кг/м}^3$ . При повышении армирования до  $104 \text{ кг/м}^3$  прочность образцов возрастает, при дальнейшем увеличении фибры до  $166 \text{ кг/м}^3$  прочность образцов достигает 5,9 МПа.

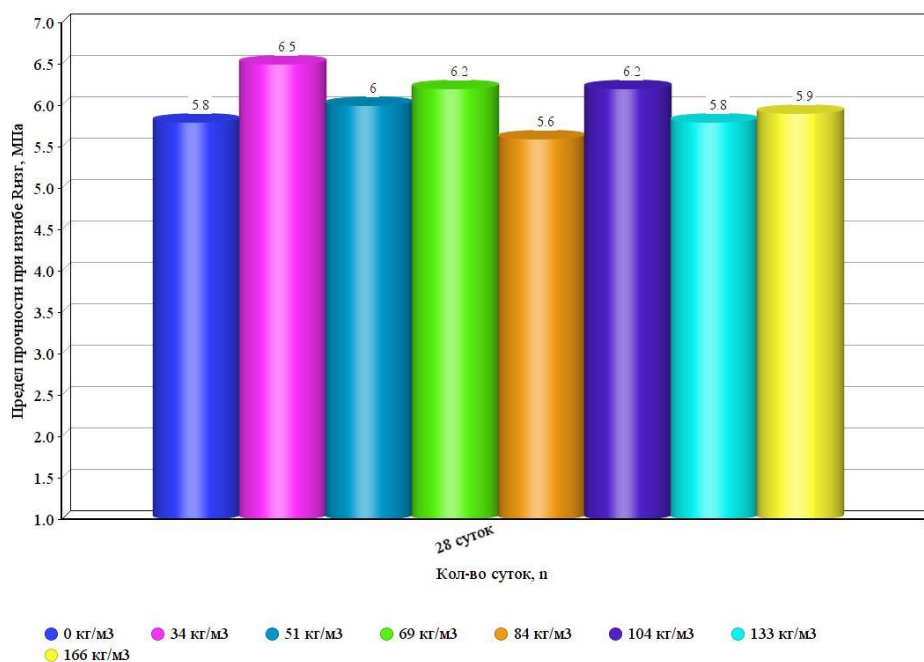


Рисунок 3.6 – Зависимость прочности фибробетона при изгибе от количества металлической фибры

Характер разрушения фибробетонного образца – призмы на изгиб представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Образец – призмы с металлической фиброй после испытания на изгиб

В современном строительстве наиболее перспективны фибробетоны, изготовленные с использованием наполнителей цемента и гиперпластификаторов.

Плотность фибробетона зависит от равномерного распределения волокон в бетонной смеси и их правильной ориентации в растворе. За счет этого изделие оказывает сопротивление внешним механическим воздействиям.

Для повышения удобоукладываемости фибробетонной смеси применяли гиперпластификатор на основе поликарбоксилатов.

В данной работе были исследованы фибробетоны с разным соотношением вяжущего и заполнителя с использованием в качестве наполнителя цемента микрокремнезема (в количестве 30% от массы цемента) и гиперпластификатора «STACHEMENT 2280».

При изготовлении фибробетонов II серии партий № 31 – 39 в качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ 42,5Н, в качестве заполнителя – песок Камского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=3,53$ .

Были изготовлены фибробетонные образцы с составами: Ц : П = 1:0,67 при В : Ц = 0,43, Ц : П = 1:1,43 при В : Ц = 0,49, Ц : П = 1:2 при В : Ц = 0,49 с металлическим фиброволокном .

Составы фибробетонной смеси с металлическими волокнами приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Составы фибробетонной смеси с металлическими волокнами

Состав	№ партии								
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	Ц : П = 1:0,67			Ц : П = 1:1,43			Ц : П = 1:2		
Единица измерения	Кг/м <sup>3</sup>								
Цемент «Азия-цемент» 42,5 Н	727	705	698	566	563	566	501	499	504
Микрокремнезем	312	303	300	243	242	243	216	215	217
Песок «Камский»	487	473	468	809	805	809	1002	998	1008
Вода	451	437	433	396	394	396	346	344	348
Фибра металлическая	87	113	146	79	101	136	80	110	146
В/Ц	0,43	0,43	0,43	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
Гиперпластификатор «STACHEMENT 2280»	10	10	10	6	6	6	7	6	7
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2076	2041	2055	2099	2111	2157	2152	2172	2230
Распływ конуса, см	80	78	75	70	70	68	68	66	62

Все фибробетонные смеси имели высокую подвижность – расплыв конуса в диапазоне 62 – 72 см. С увеличением количества фибры подвижность бетонной смеси, т.е. расплыв конуса уменьшался, достигал минимальной величины. В связи с повышенным количеством цемента (соотношение Ц : П = 1:0,67) бетонные смеси имели высокую подвижность – расплыв конуса до 80 см, что приравнивает их к категории самоуплотняющихся. Бетонные смеси не расслаивались, отличались повышенной связностью, по типу бетона данные смеси относятся к бетонным смесям мелкозернистого бетона.

В ходе испытаний установлено, что образцы, армированные металлической фиброй, имеют признаки пластичного разрушения (рисунок 3.8). Сама фибра не разрывалась, что говорит о ее надежном сцеплении с матрицей композита. За счет этого повышается срок эксплуатации и безопасность использования изделий из него.

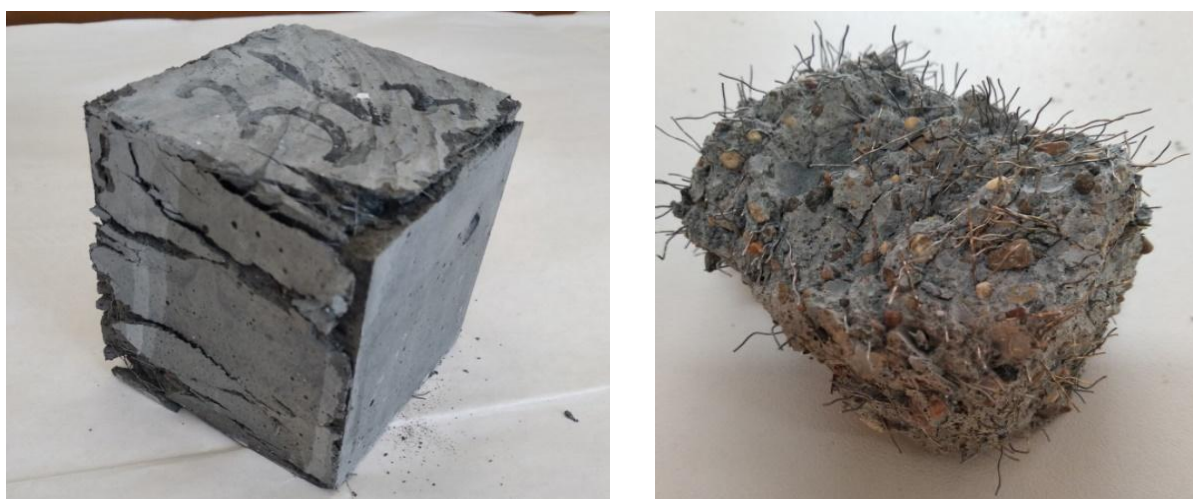


Рисунок 3.8 – Образцы фибробетонов с металлической фиброй, микрокремнеземом и гиперпластификатором

Результаты исследований образцов на сжатие с металлической фиброй и специальными наполнителями представлены в таблице 3.5 и на рисунке 3.9.

Таблица 3.5 – Пределы прочности при сжатии образцов с металлической фиброй

Возраст образцов	№ партии								
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	Ц : П = 1:0,67			Ц : П = 1:1,43			Ц : П = 1:2		
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>								
	87	113	146	79	101	136	80	110	146
	Предел прочности при сжатии, МПа								
7 суток	42,7	41,6	43,3	33,8	28,5	32,3	34,7	34,3	33,3
14 суток	46,7	46	46,8	40,6	38,5	37,0	42,0	41,8	41,1
28 суток	49,9	55,5	61,0	48,9	51,3	52,7	46,8	47,4	50,1

На рисунках 3.9, 3.10, 3.11 и 3.12 показаны прочности образцов бетона на сжатие в зависимости от количества металлической фибры в бетонной смеси составов Ц : П = 1:0,67, 1:1,43 и 1:2,0.

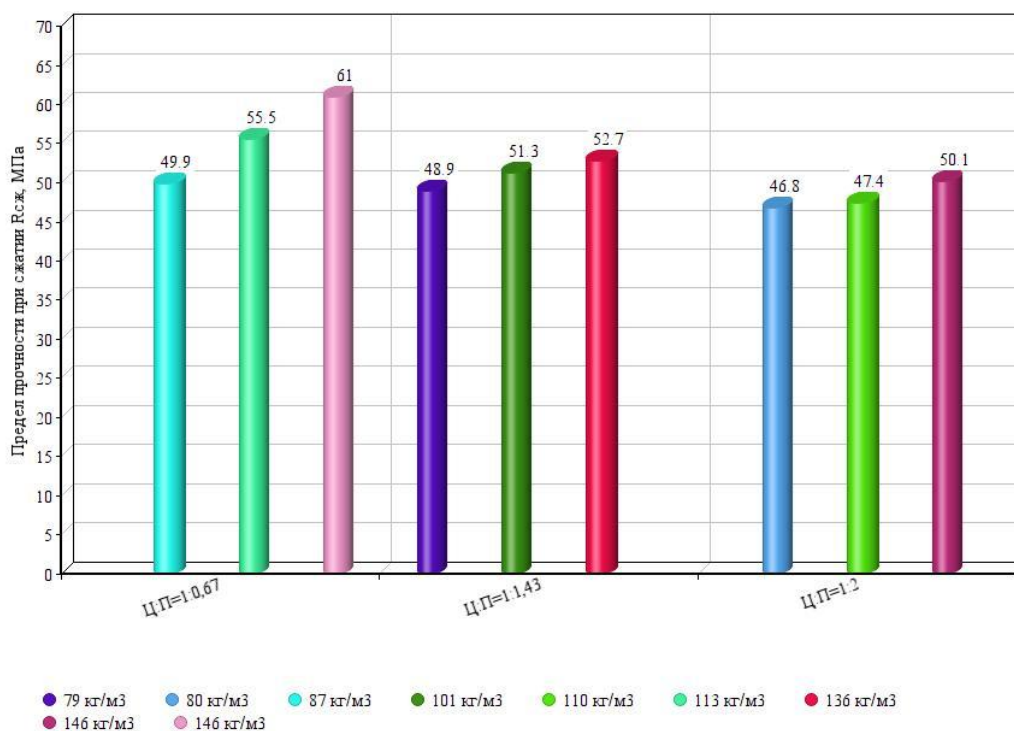


Рисунок 3.9 – Предел прочности фибробетона при сжатии в 28 суток от степени армирования металлическим фиброволокном

Как свидетельствуют данные рисунка 3.9, наилучшие результаты показывают образцы фибробетона при соотношении Ц : П = 1:0,67. С увеличением армирования прочность фибробетона возрастает.

При армировании в количестве 146 кг/м<sup>3</sup> прочность при сжатии достигает 61 МПа, при изгибе – 9,1 МПа (таблица 3.5 и 3.6). В более тощих

фибробетонах (Ц : П = 1:1,43 и Ц : П = 1:2) при таком армировании прочность фибробетонов при сжатии снижается соответственно на 13,6% и 17,8%, прочности при изгибе снижается – на 26% и 13% не смотря на высокую степень однородности. Класс полученных фибробетонов по прочности соответствует классу В35. Фибробетоны с высоким содержанием цемента партии №33 (Ц : П = 1:0,67) с количеством металлической фибры 146 кг/м<sup>3</sup> набирают прочность, соответствующую классу В45. Исследуемые фибробетоны с металлическим фиброволокном, наполнителем цемента – микрокремнеземом и гиперпластификатором могут использоваться в производстве для изготовления наливных полов промышленных зданий и фундаментов под оборудование.

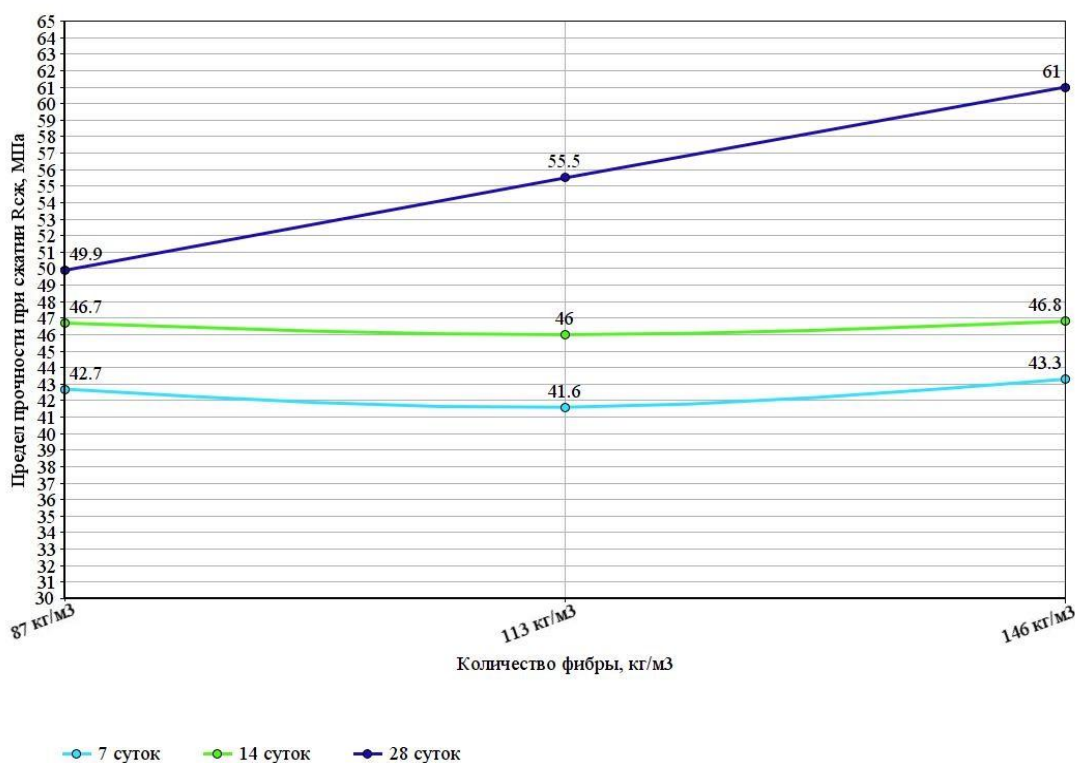


Рисунок 3.10 – Предел прочности фибробетона при сжатии в зависимости от степени армирования фиброволокном при Ц : П = 1:0,67



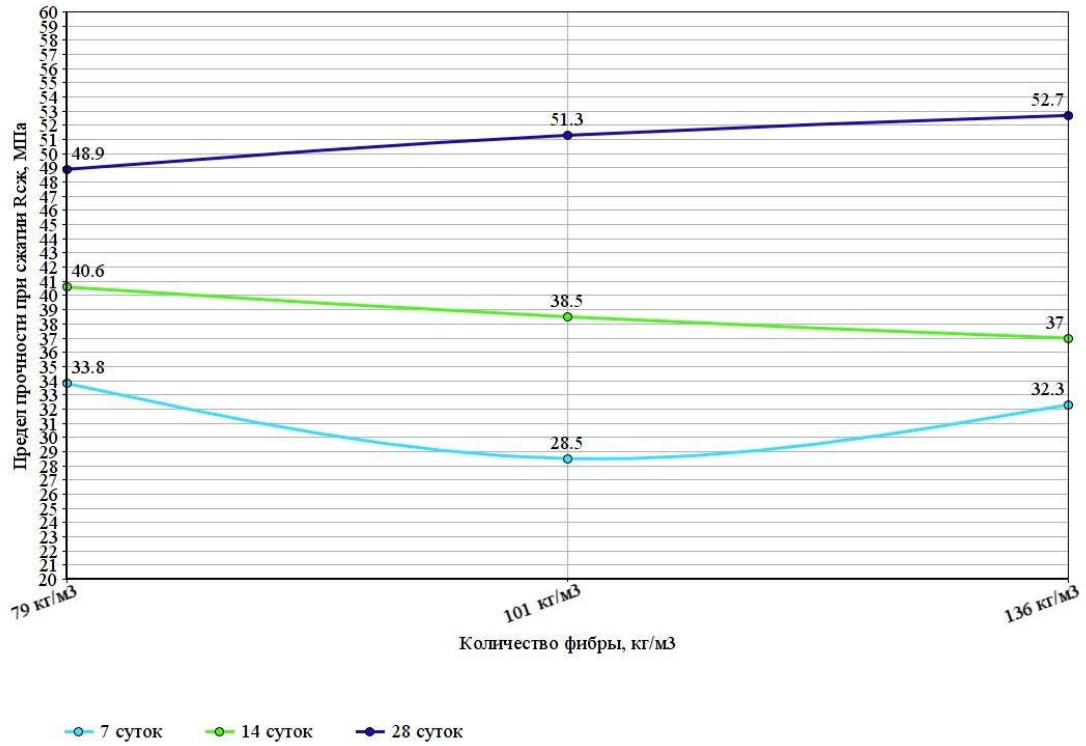


Рисунок 3.11 – Предел прочности фибробетона при сжатии в зависимости от степени армирования фиброволокном при Ц : П = 1:1,43

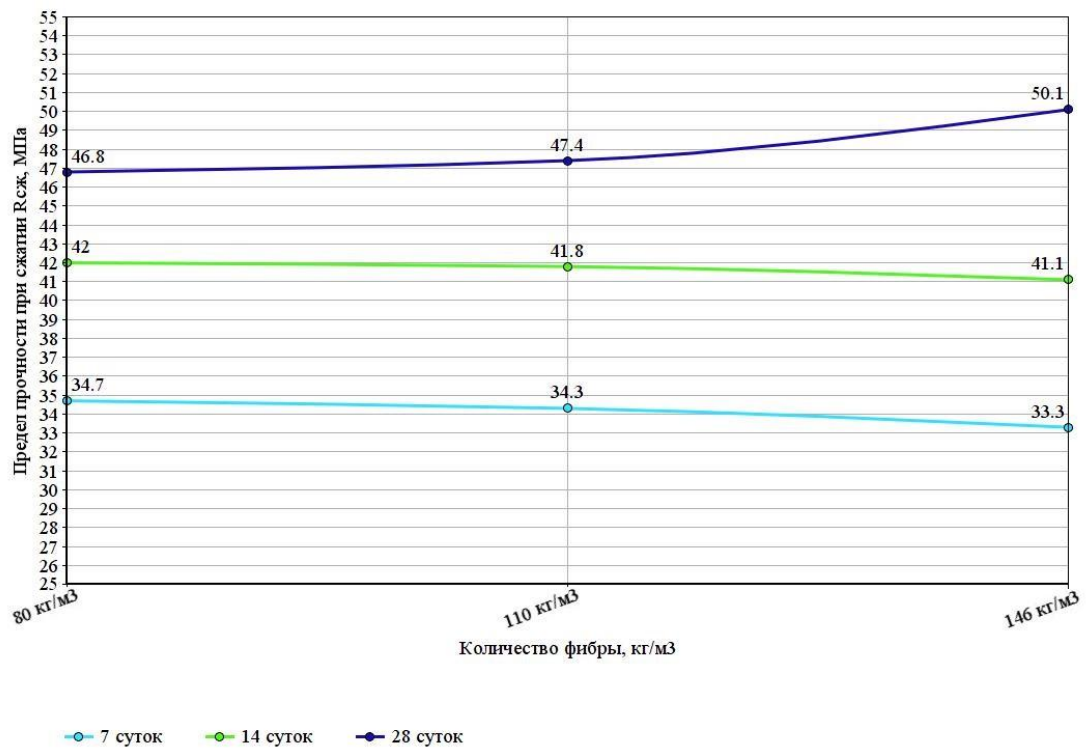


Рисунок 3.12 – Предел прочности фибробетона при сжатии в зависимости от степени армирования фиброволокном при Ц : П = 1:2



Как видно из рисунка 3.10, наибольшую прочность при сжатии в 28 суток имеют образцы фибробетона с дозировкой фибры 146 кг/м<sup>3</sup>, что составляет 7,1% от массы бетонной смеси.

Анализируя данные рисунков 3.10, 3.11 и 3.12 представляется отметить, что с увеличением количества металлической фибры в мелкозернистых бетонах, его прочность плавно возрастает. С увеличением фибры в фибробетоне жирной смеси (Ц : П = 1:0,67) зафиксированы наилучшие результаты набора прочности, чем у более тощей смеси (Ц : П = 1:2).

Исследования показали, что в семисуточном возрасте прочностные характеристики выше у фибробетонов с наименьшим армированием металлическим фиброволокном.

Прочность фибробетонов в 7 суток составляет 85% от марочной у фибробетонов партий №31 и №34 с армированием соответственно, в количестве 87 кг/м<sup>3</sup> и 79 кг/м<sup>3</sup>. С увеличением количества армирующего волокна до 136 кг/м<sup>3</sup> и 146 кг/м<sup>3</sup> прочность бетона в 7 суток составляет всего 61% и 71% от марочной прочности соответственно.

Обработка прочностных характеристик более тощих фибробетонов (Ц : П = 1:2) показала, что набор прочности фибробетонов происходит равномерно, независимо от количества армирующего металлического фиброволокна и в семисуточном возрасте составляет в пределах 67% – 73% от марочной прочности.

Результаты исследований образцов на изгиб с металлической фиброй представлены в таблице 3.6 и на рисунке 3.13.

Таблица 3.6 – Пределы прочности при изгибе образцов с металлической фиброй в 28 суток

Возраст образцов	№ партии								
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	Ц : П = 1:0,67			Ц : П = 1:1,43			Ц : П = 1:2		
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>								
	87	113	146	79	101	136	80	110	146
	Предел прочности при изгибе, МПа								
28 суток	7,7	8,3	9,1	7	6,8	6,7	7,3	7,7	7,9

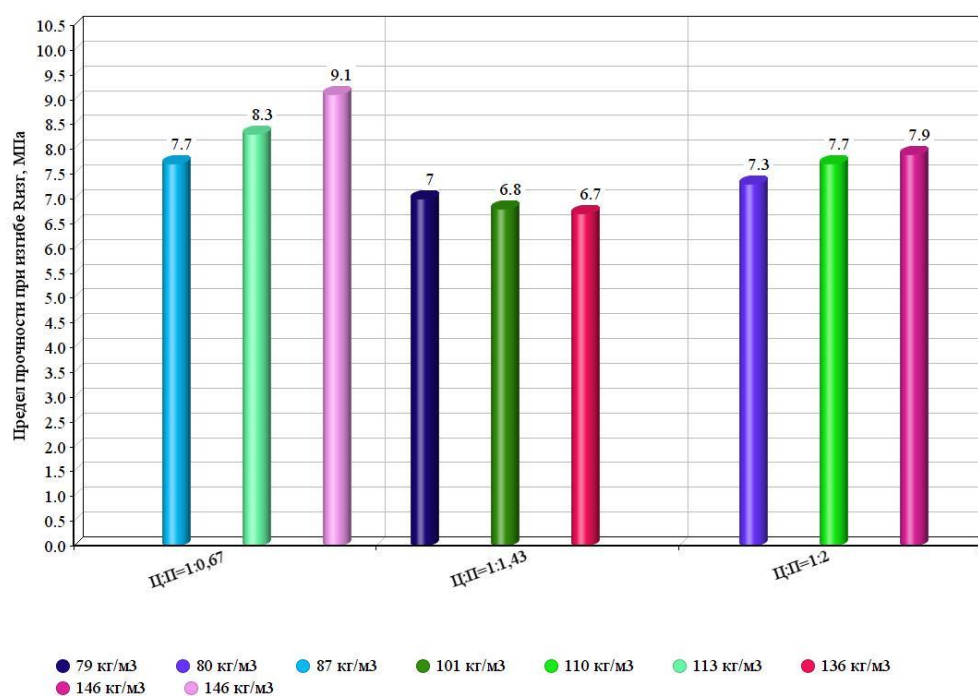


Рисунок 3.13 – Предел прочности фибробетона при изгибе с разным количеством металлической фибры

Наилучшие результаты по пределу прочности при изгибе имеют фибробетоны с высоким содержанием цемента ( $\text{Ц} : \text{П} = 1:0,67$ ). С увеличением количества армирующего волокна предел прочности при изгибе фибробетонов повышается. При сокращении расхода цемента ( $\text{Ц} : \text{П} = 1:2$ ) значения прочности при изгибе ухудшаются незначительно, по сравнению с жирными фибробетонами ( $\text{Ц} : \text{П} = 1:0,67$ ), всего на 5%, 7% и 15% при минимальном, среднем и максимальном армировании.

### 3.2 Исследование свойств бетона с полипропиленовыми армирующими волокнами

Для изготовления фибробетонных образцов серии III партий 2,9,10,11 с соотношением  $\text{Ц} : \text{П} = 1:1,39$ , были использованы портландцемент «Мордовцемент», ЦЕМ 42,5 Б, природный песок Волжского месторождения с модулем крупности  $M_{кр}=1,3$ , полипропиленовая фибра. Полипропиленовое фиброволокно вводилось в состав бетонной смеси в количестве 8 (0,4), 10 (0,5), 11 (0,52), 14 (0,6)  $\text{кг/м}^3$  (% от массы бетонной смеси). Расплав

фибробетонной смеси определяли путем измерения величины расплыва на встряхивающем столе. Составы бетонных смесей с полипропиленовой фиброй приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Составы фибробетонной смеси с полипропиленовой фиброй

Состав	№ партии				
	8	9	10	11	2
	Ц : П=1:1,39				
Единица измерения	Кг/м <sup>3</sup>				
Цемент «Мордов цемент» 42,5 Б	757	744	729	728	737
Песок «Волжский»	1051	1033	1013	1011	1024
Вода	379	372	365	364	368,5
Фибра полипропиленовая	-	8	10	11	14
В/Ц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2187	2157	2117	2114	2143
Расплыв конуса, см	61	52	56	58	50

Отличительной чертой изготовления фибробетонной смеси с полипропиленовой фиброй по сравнению с металлической фиброй является расщепление полипропиленовой фибры на отдельные части, кроме того, за счет поглощения полипропиленовой фиброй воды, фибробетонная смесь становится менее подвижной.



Рисунок 3.14 – Приготовление фибробетонной смеси с полипропиленовой фиброй

Результаты исследований фибробетонных образцов на сжатие с полипропиленовой фиброй представлены в таблице 3.8 и на рисунках 3.15, 3.16.

Таблица 3.8 – Пределы прочности при сжатии образцов с полипропиленовой фиброй

Возраст образцов	№ партии				
	8	9	10	11	2
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>				
	0	8	10	11	14
Предел прочности при сжатии, МПа					
7 суток	29,5	29,2	27,2	21,3	23,4
14 суток	31,2	35,7	36,5	33,8	31,5
28 суток	38,7	42,0	39,0	38,5	33,0

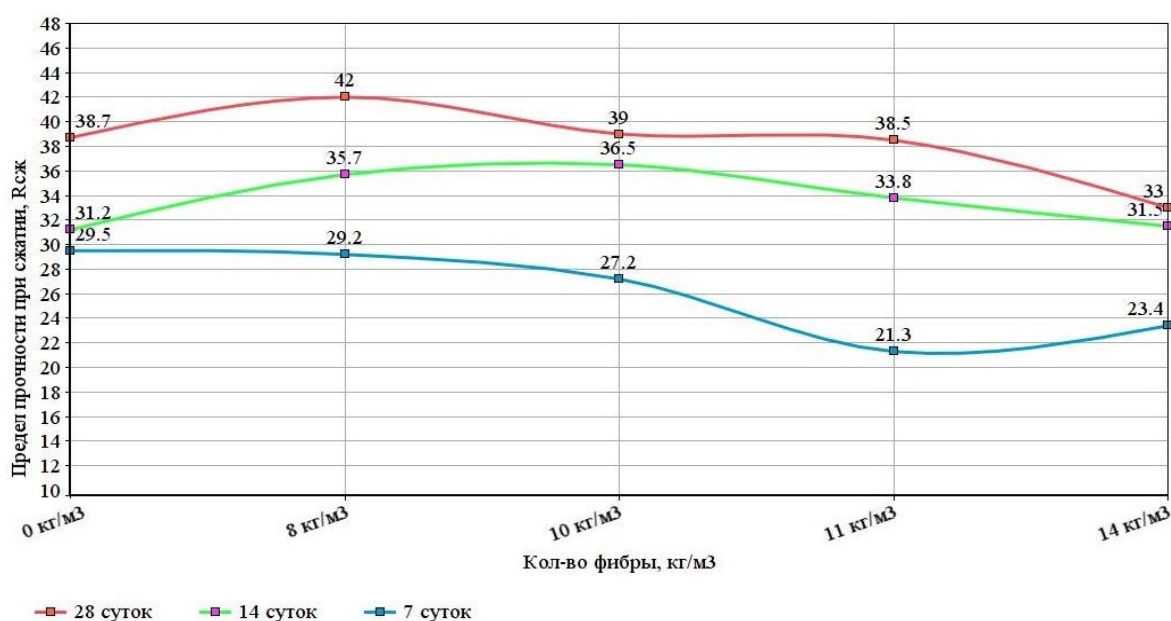


Рисунок 3.15 – Предел прочности фибробетона при сжатии от степени армирования полипропиленовым фиброволокном

Наилучшие результаты по прочности при сжатии (рисунок 3.15 и 3.16) показывают образцы фибробетона с количеством полипропиленовой фибры 8 кг/м<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение армирования бетонов полипропиленовой фиброй приводит к снижению их прочности. При дозировке полипропиленовой фибры в количестве 14 кг/м<sup>3</sup> прочность образцов фибробетона снижается на 20% по сравнению с прочностью образцов с содержанием фибры в количестве 8 кг/м<sup>3</sup>. При содержании фиброволокна 14 кг/м<sup>3</sup> наблюдалось комкование фибры и неравномерное распределение фиброволокон в объеме бетонной смеси, вследствие чего ухудшалась формуемость образцов.

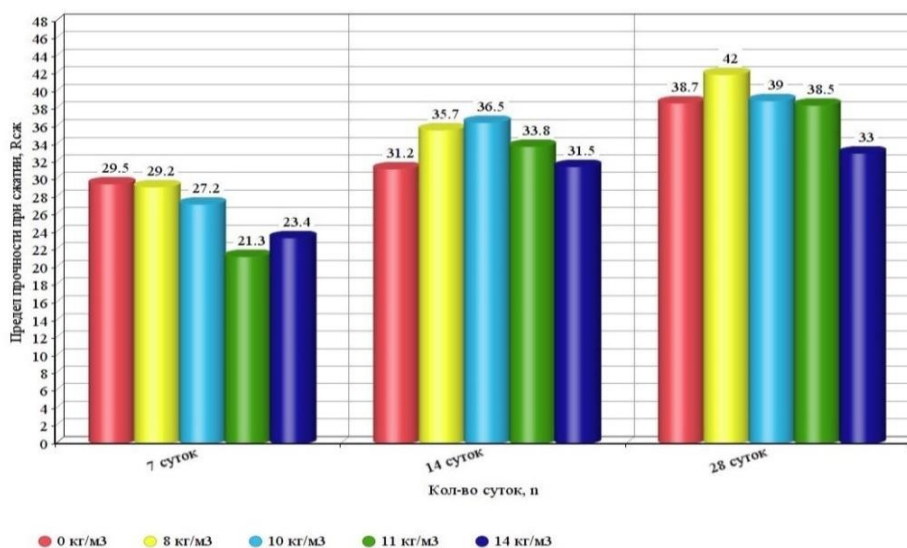


Рисунок 3.16 – Зависимость прочности фибробетона на сжатие в зависимости от количества полипропиленовой фибры

Результаты исследований образцов на изгиб с полипропиленовой фиброй представлены в таблице 3.9 и на рисунках 3.17 и 3.18.

Таблица 3.9 – Пределы прочности при изгибе образцов с полипропиленовой фиброй в 28 суток

Возраст образцов	№ партии				
	8	9	10	11	2
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>				
	0	8	10	11	14
28 суток	5,8	5,5	5,9	6,2	5,0

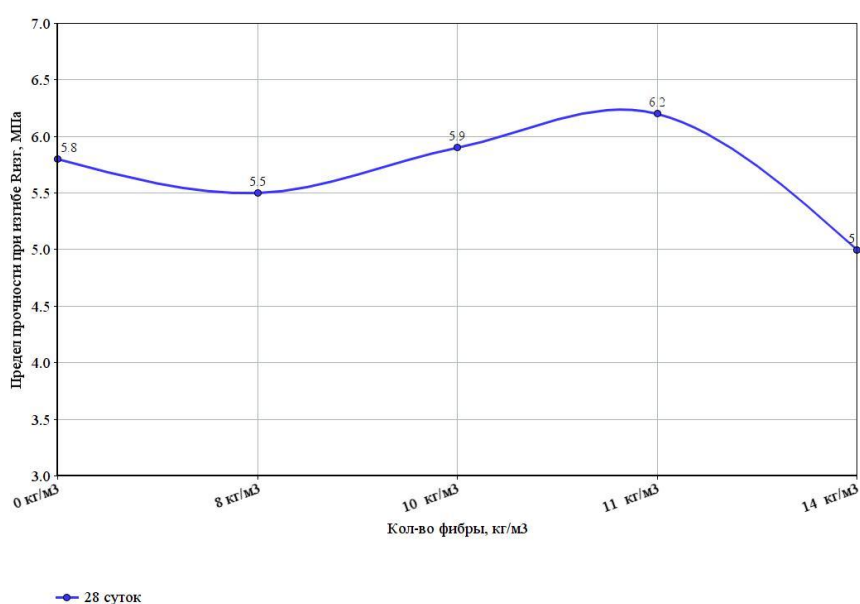


Рисунок 3.17 – Предел прочности фибробетона при изгибе от степени армирования полипропиленовым фиброволокном

Кривая прочности на изгиб  $R_{изг}$ . (рисунок 3.17) в зависимости от количества фибры несколько отличается от кривой на сжатие  $R_{сж}$ . (рисунок 3.15). При изгибе наилучшие результаты показывают образцы фибробетона с количеством полипропиленовой фибры  $11 \text{ кг/м}^3$ . Дальнейшее увеличение дозировки полипропиленового фиброволокна приводит к снижению подвижности смесей и прочности (таблица 3.7 и рисунок 3.17).

Наибольшую прочность при сжатии показали образцы фибробетонов с количеством фибры  $8 \text{ кг/м}^3$ , при изгибе –  $11 \text{ кг/м}^3$ . При сравнении результатов исследований предела прочности при изгибе (рисунок 3.17 и 3.18) видно, что при изгибе прочность образцов с количеством фибры  $11 \text{ кг/м}^3$  возросла на 12,7% по сравнению с пределом прочности образцов, содержащих  $8 \text{ кг/м}^3$  полипропиленового фиброволокна.

Таким образом, оптимальным количеством полипропиленового фиброволокна является его содержание в пределах от  $8 \text{ кг/м}^3$  до  $11 \text{ кг/м}^3$ .

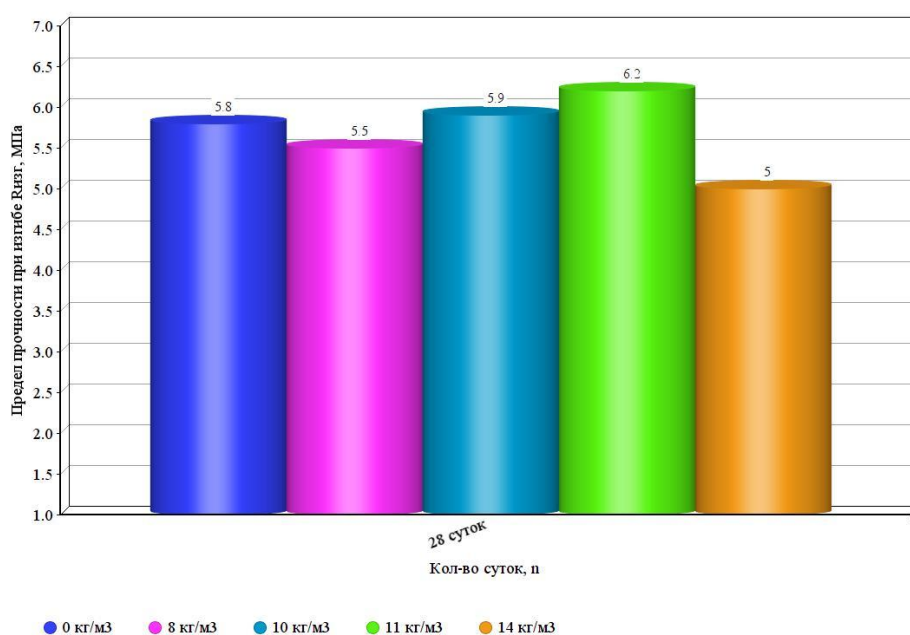


Рисунок 3.18 – Зависимость прочности фибробетона на изгиб в зависимости от количества полипропиленовой фибры

В ходе сравнения результатов испытаний предела прочности на изгиб (рисунок 3.17 и 3.18) определено, что использование полипропиленового фиброволокна с процентом армирования 0,6 % ( $14 \text{ кг/м}^3$ ) от массы бетонной

смеси приводит к снижению прочности на изгиб по сравнению с контрольным образцом бетона. Следовательно, дисперсное армирование данного состава полипропиленовым фиброволокном в количестве более 11 кг/м<sup>3</sup> нецелесообразно для конструкций, работающих на изгиб.

На рисунке 3.19 изображен характер разрушения фибробетона с полипропиленовым фиброволокном после испытания на изгиб.



Рисунок 3.19 – Образец партии №2 после испытания на изгиб

Для изучения влияния гиперпластификатора на основе поликарбоксилатов на прочностные характеристики фибробетонов с использованием в качестве фибры полипропиленового волокна была изготовлена серия образцов партий № 40 – 43.

В экспериментах серии IV партий № 40 – 43 в качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ 42,5Н, в качестве заполнителя – песок Камского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=3,53$ , гиперпластификатор «STACHEMENT 2280» и микрокремнезем.

Были изготовлены образцы с составами: Ц : П = 1:1,43 при В : Ц = 0,45 и Ц : П = 1:2 при В : Ц= 0,5.

Составы фибробетонной смеси с полипропиленовыми волокнами приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Составы фибробетонной смеси с полипропиленовым волокном

Состав	№ партии			
	40	41	42	43
	Ц : П = 1:1,43		Ц : П = 1:2	
Единица измерения	Кг/м <sup>3</sup>			
Цемент «Азия-цемент» 42,5 Н	578	560	490	475
Микрокремнезем	248	241	211	205
Песок «Камский»	825	801	980	950
Вода	376	392	341	348
Фибра полипропиленовая	7	10	7	10
В/Ц	0,45	0,5	0,48	0,5
Гиперпластификатор «СТАСЕМЕНТ 2280»	7	7	6	6
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2041	2011	2035	1994
Распływ конуса, см	62	63	59	60

Результаты исследований образцов на сжатие и изгиб с полипропиленовой фиброй и специальными наполнителями представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Предел прочности при сжатии образцов с полипропиленовой фиброй

Возраст образцов	№ партии			
	40	41	42	43
	Кол-во фибры кг/м <sup>3</sup>			
	7	10	7	10
Предел прочности при сжатии, МПа				
7 суток	37	30,9	28,5	26,4
14 суток	45,1	37,6	37,3	35,9
28 суток	52,4	47,7	46,1	45,3
Предел прочности при изгибе, МПа				
28 суток	7,9	7,2	7,1	7,0

На рисунке 3.20 показаны прочностные характеристики образцов бетона на сжатие в зависимости от количества полипропиленовой фибры в бетонной смеси составов Ц : П = 1:1,43 и 1:2,0.



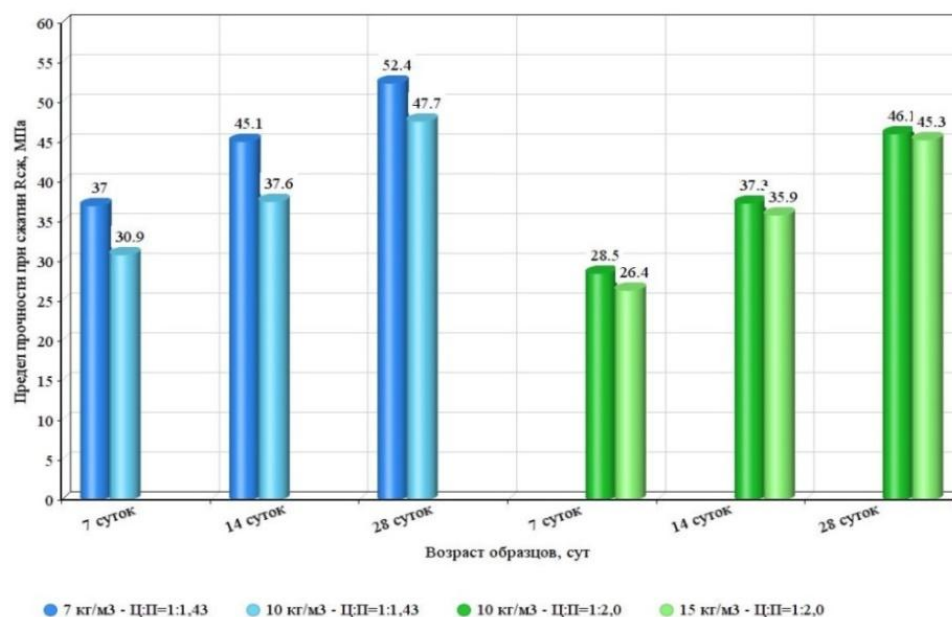


Рисунок 3.20 – Предел прочности фибробетона при сжатии в зависимости от соотношения компонентов бетонной смеси и степени армирования полипропиленовым фиброволокном

Данные таблицы 3.11 и рисунка 3.20 свидетельствуют о том, что наибольшее значение прочности при сжатии в 28 суток (52,4 МПа) и изгибе (7,9 МПа) имеют образцы бетона при содержании фибры в смеси в количестве  $7 \text{ кг/м}^3$  при соотношении Ц : П = 1:1,43. В течение 7 суток данный фибробетон (армирование полипропиленовой фиброй –  $7 \text{ кг/м}^3$ ) набирает 71% от марочной прочности в возрасте 28 суток, а фибробетон данного состава с армированием в количестве  $10 \text{ кг/м}^3$  – 65% от марочной прочности.

С уменьшением количества цемента в составе фибробетонной смеси (Ц : П = 1:2) прочность бетона в течение 7 суток набирается медленнее – в пределах 58% – 62% от прочности в 28 суток.

Использование при приготовлении фибробетона гиперпластификатора «STACHEMENT 2280» и микронаполнителя – микрокремнезема сокращает расход цемента на 24% (таблица 3.10). Гиперпластификатор «STACHEMENT 2280» относится к разряду «быстрых» гиперпластификаторов, так как обладает ускоряющим эффектом и соответственно дает высокие ранние прочности фибробетона. Данный гиперпластификатор уменьшает количество воды затворения, препятствует вовлечению лишнего воздуха в бетон,

подходит для армированных и предварительно напряженных конструкций, так как не содержит хлоридов.

Данные исследований показывают, что самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны для монолитных конструкций (классом не ниже В35) могут быть изготовлены из доступных в регионе материалов: цемента, природного песка, наполнителей цемента, гиперпластификаторов на основе поликарбоксилатов и металлического или пропиленового фиброволокна.

Данный фибробетон отличается повышенной удобоукладываемостью и технологичностью. При этом прочностные свойства полученного фибробетона улучшены введением в него наполнителя цемента – микрокремнезема.

На рисунке 3.21 изображен образец фибробетона после испытания на сжатие с количеством полипропиленового фиброволокна  $10 \text{ кг/м}^3$ , наполнителем и гиперпластификатором.

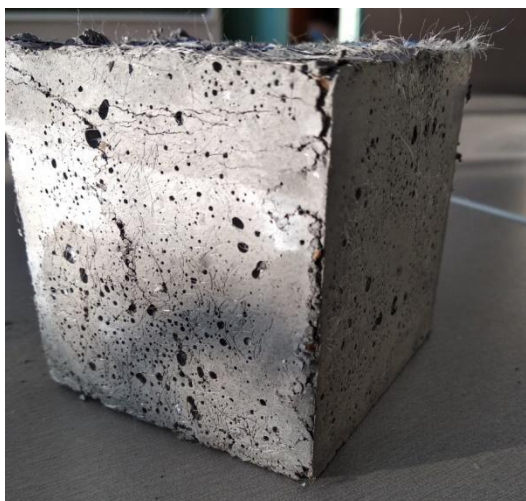


Рисунок 3.21 – Образец партии №43 после испытания на сжатие

Из рисунка 3.21 видно, что с увеличением количества полипропиленового волокна при испытании образцов фибробетона на сжатие заметно уменьшается их трещинообразование.

Основываясь на проведенных нами ранее исследованиях (серия III) были изготовлены образцы тяжелых фибробетонов, дисперсно-

армированных полипропиленовым волокном серии V партий №45, 46, 47, 48. Составы тяжелой фибробетонной смеси приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Составы фибробетонной смеси с полипропиленовым волокном

Состав	№ партии			
	45	46	47	48
Единица измерения	Кг/м <sup>3</sup>			
Цемент «Мордов цемент» 42,5 Б	698	699	699,5	691
Песок «Волжский»	794	793	794	784
Щебень 5 –10 гранодиориты	437	436	437	432
Вода	313	314	315	311
Фибра полипропиленовая	-	3	5,5	9
В/Ц	0,45	0,45	0,45	0,45
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2242	2245	2251	2227
Осадка конуса, см	6,0	5,5	5	4,5

Результаты испытаний образцов тяжелых фибробетонов дисперсно-армированных полипропиленовым волокном на сжатие и изгиб представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Предел прочности при сжатии и изгибе образцов с полипропиленовой фиброй

Возраст образцов	№ партии			
	45	46	47	48
	Кол-во фибры, кг/м <sup>3</sup>			
	0	3	5,5	9
	Предел прочности при сжатии, МПа			
7 суток	27,1	30,9	35,5	33,4
28 суток	40,0	47,7	48,4	44,9
	Предел прочности при изгибе, МПа			
28 суток	6,3	7,1	7,3	6,7

На рисунках 3.22, 3.23 показаны прочностные образцы бетона на сжатие в зависимости от количества полипропиленовой фибры в бетонной смеси.

Результаты исследований (рисунок 3.22 и 3.23) показывают, что использование полипропиленовых волокон в тяжелых фибробетонах в количестве до 5,5 кг/м<sup>3</sup> увеличивает прочность фибробетона на сжатие на 17% по сравнению с фибробетоном без фибры на всех стадиях твердения фибробетона (7 и 28 суток). Получен фибробетон класса В35. Дальнейшее

увеличение количества фибры до  $9 \text{ кг/м}^3$  приводит к снижению прочности как на сжатие, так и на изгиб.

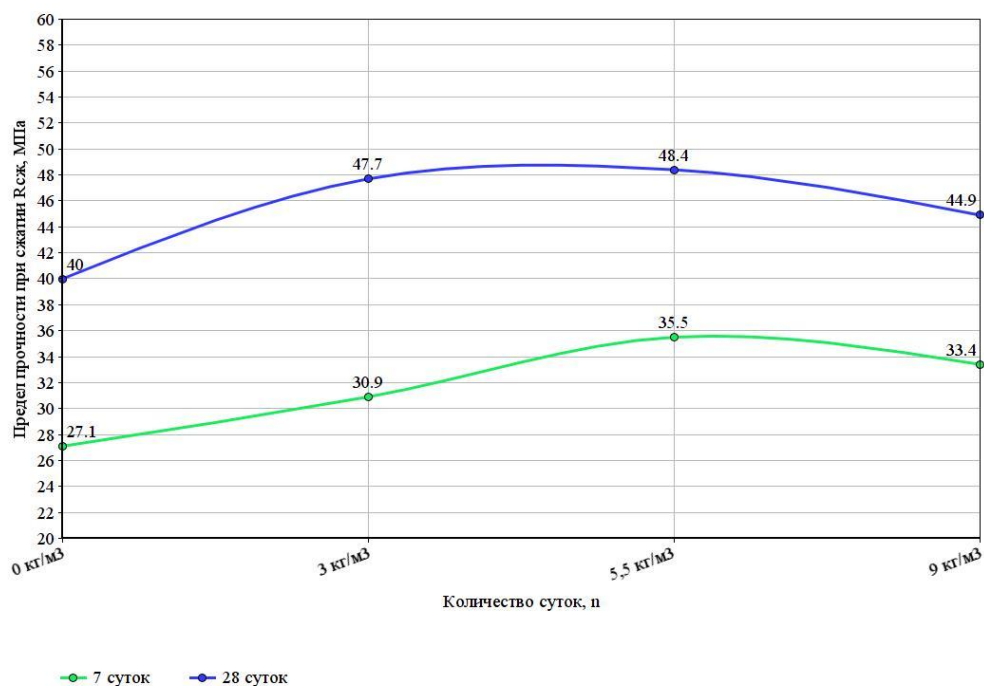


Рисунок 3.22 – Предел прочности тяжелого фибробетона при сжатии в зависимости от степени армирования полипропиленовым фиброволокном

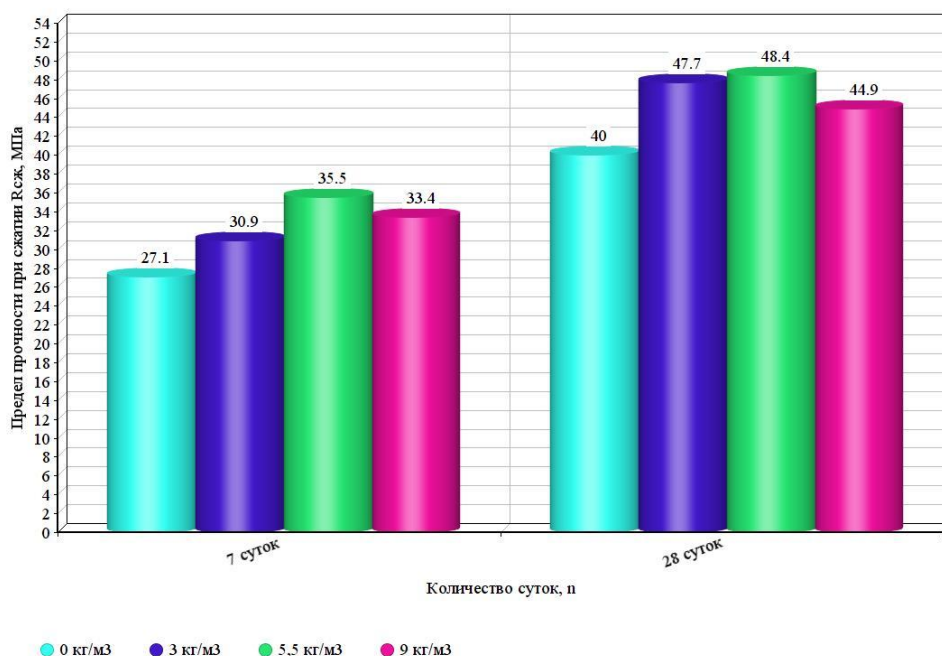


Рисунок 3.23 – Предел прочности тяжелого фибробетона при сжатии в зависимости от степени армирования полипропиленовым фиброволокном

Результаты испытаний образцов тяжелых фибробетонов дисперсно-армированных полипропиленовым волокном на изгиб представлены на рисунке 3.24.

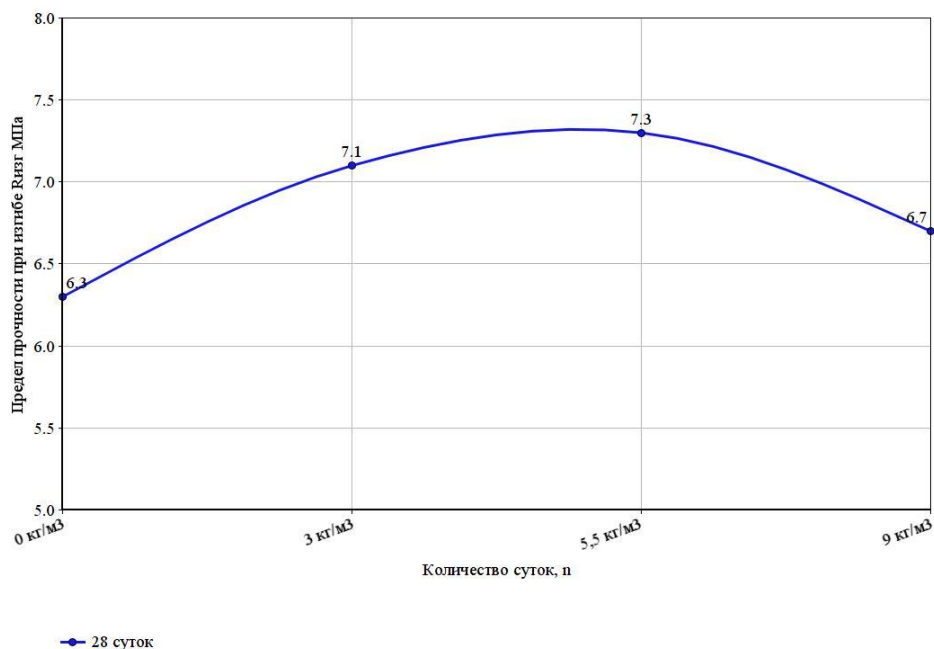


Рисунок 3.24 – Предел прочности тяжелого фибробетона при изгибе в зависимости от степени армирования полипропиленовым фиброволокном

### 3.3 Исследование свойств фибробетона с использованием фиброволокна из отходов производства

В качестве фиброволокна исследовались отходы производства «КуйбышевАзот» – полиамидные волокна.

Были изготовлены мелкозернистые самоуплотняющиеся фибробетоны серии VI партии №12 с составом Ц : П = 1:1,39 при В : Ц = 0,5 и №44 с составом матрицы: Ц : П = 1:2 при В : Ц = 0,48 с фиброволокном из отходов производства «КуйбышевАзот» – полиамидными волокнами.

Для изготовления партии №12, были использованы портландцемент «Мордовцемент» ЦЕМ 42,5Б и природный песок Волжского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=1,3$ , в качестве фибры - полиамидные волокна.

Для изготовления партии №44, были использованы портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н, крупный песок Камского месторождения с

модулем крупности  $M_{кр.}=3,5$ , микрокремнезем, гиперпластификатор «STACHEMENT 2280», в виде фибры - полиамидные волокна.

Полиамидное фиброволокно вводилось в составы бетонных смесей в количестве  $7 \text{ кг/м}^3$  от массы. Распływ фибробетонной смеси определяли путем измерения величины расплыва на встряхивающем столе. Составы фибробетонной смеси с полиамидными волокнами приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Составы фибробетонной смеси с полиамидными волокнами

Состав	№ партии	
	12	44
	Ц : П=1:1,39	Ц : П=1:2
Единица измерения	Кг/м <sup>3</sup>	
Цемент «Мордов цемент» 42,5 Б	739	-
Цемент «Азия-цемент» 42,5 Н	-	513
Микрокремнезем	-	221
Песок «Волжский»	1027	-
Песок «Камский»	-	1026
Вода	370	354
Фибра - полиамидные волокна	7	7
В/Ц	0,5	0,48
Гиперпластификатор «STACHEMENT 2280»	-	7
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2143	2128
Распływ конуса, см	62	65

Технология изготовления фибробетонных образцов с полиамидными волокнами (партия №44) осуществлялась путем перемешивания компонентов бетонной смеси в сухом виде, для равномерного распределения фиброволокна, после чего добавляли воду с гиперпластификатором и вновь перемешивали. В партию №44 микрокремнезем вводился в состав смеси в количестве 30% от массы цемента. Также в данную фибробетонную смесь добавлялся гиперпластификатор «STACHEMENT 2280» в количестве 1% от массы цемента. Применение гиперпластификатора в составе бетонной смеси позволяет улучшить удобоукладываемость фибробетона, получить смесь с большей подвижностью (партия №44).

Фибробетонная смесь получилась достаточно подвижная с небольшим водоотделением.

Полиамидные волокна гораздо лучше и легче перемешиваются и равномерно распределяются в фибробетонной смеси, чем полипропиленовое фиброволокно.

Результаты исследований образцов на сжатие с полиамидным волокном представлены в таблице 3.15 и на рисунке 3.25.

Таблица 3.15 – Результаты испытаний образцов партий №12 и №44 на сжатие и изгиб

Возраст образцов	№ партии	
	12	44
	Ц : П=1:1,39	Ц : П=1:2
	Кол-во фибры кг/м <sup>3</sup>	
	7	7
	Предел прочности при сжатии, МПа	
7 суток	26,6	33,8
14 суток	34,2	43,2
28 суток	40,2	50,3
	Предел прочности при изгибе, МПа	
28 суток	6	7,5

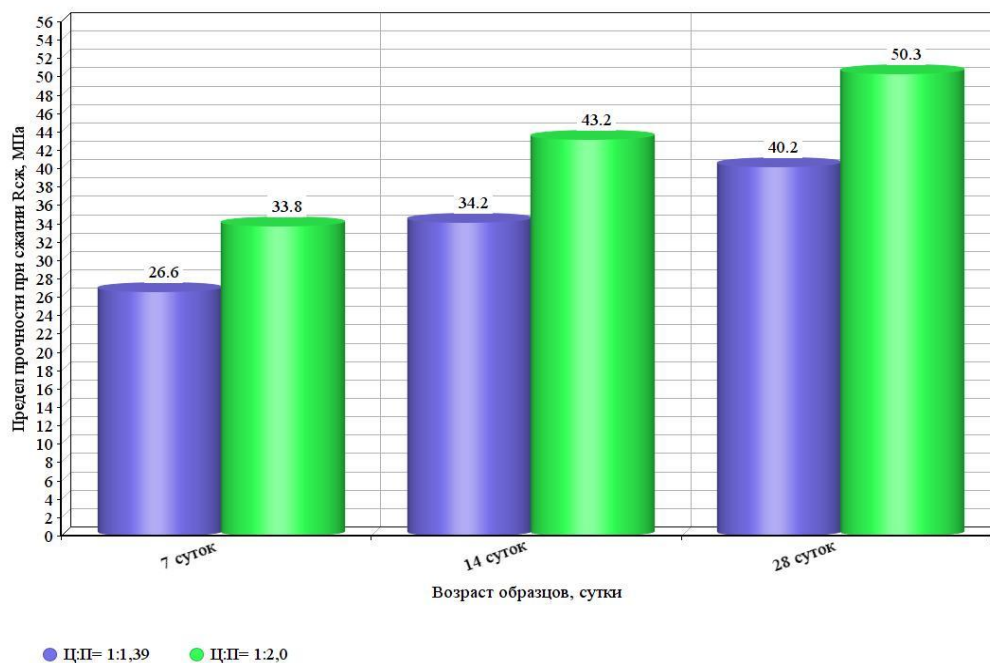


Рисунок 3.25 – Предел прочности фибробетона при сжатии в зависимости от соотношения компонентов бетонной смеси при одинаковом количестве армирования полиамидным волокном

По результатам экспериментов прочность при сжатии фибробетона с использованием полиамидных волокон (партия №44) в 28 – суточном возрасте на 8,3% выше по сравнению с прочностью фибробетона на полипропиленовом волокне (партия №42). В семисуточном возрасте фибробетон на полиамидном волокне набирает прочность 70% от марочной.

Использование в качестве наполнителя цемента – микрокремнезема положительно сказалось на прочностных характеристиках исследуемого фибробетона.

Снизился расход цемента, в среднем на 20% увеличилась прочность фибробетона (таблица 3.15) и при сжатии и при изгибе. Использование микрокремнезема позволяет получить фибробетон с высокими прочностными характеристиками.

На рисунках 3.26 и 3.27 представлен образцы фибробетонов с отходами производства «КуйбышевАзот» – полиамидными волокнами после испытания на сжатие и изгиб.

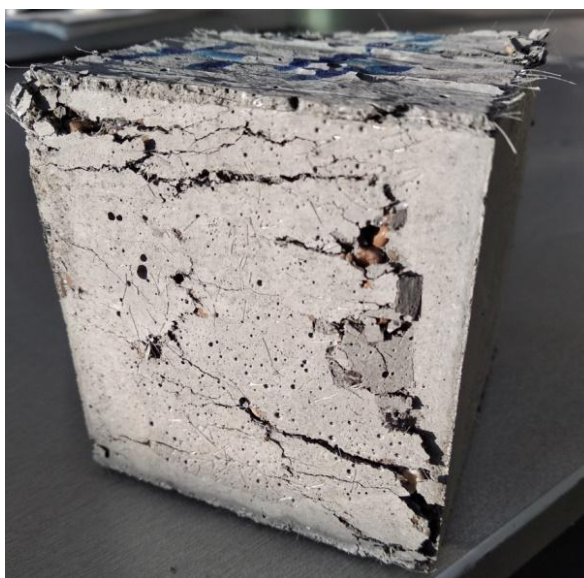


Рисунок 3.26 – Образец куба с полиамидным волокном после испытания

Полиамидные волокна эффективно улучшают рабочие характеристики фибробетонов под нагрузками, улучшая сопротивление фибробетона действию растягивающих напряжений и ударному воздействию, что соответствует пластическому характеру разрушения. За счет этого



повышается срок эксплуатации и безопасность использования изделий и конструкций из данного фибробетона.



Рисунок 3.27 – Образец партии №12 после испытания на изгиб

Сравнивая с полипропиленовой фиброй полиамидные волокна обладают повышенной прочностью на разрыв и когезией с бетоном, это улучшает контроль трещинообразования в среднем на 50%.

### **3.4 Технико – экономическое обоснование использования фибробетона на основе металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства**

В настоящее время строительство ведется с применением способов и методов, при которых достигаются наиболее оптимальные технико – экономические показатели. Главная цель этих методов заключается в снижении себестоимости строительства, упрощение технологии производства и экономии ресурсов.

В процессе экспериментов были исследованы VI серий фибробетонов (48 партий), изготовленных из металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов промышленного производства.

Себестоимость производства мелкозернистого фибробетона с использованием микрокремнезема и гиперпластификатора, с

оптимизированной упаковкой заполнителя, складывается из стоимости исходных сырьевых компонентов.

Стоимость 1 м<sup>3</sup> фибробетонов (Ц : П = 1:2) II серии с металлической фиброй наполнителем цемента и гиперпластификатором представлены в таблицах 3.16, 3.17 и 3.18.

Таблица 3.16 – Стоимость материалов для приготовления одного кубического метра мелкозернистого фибробетона партии №37 с металлической фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н	0,501	6 500	3 256,5
Камский песок	1,002	650	651,3
Фибра волнового профиля ФСВ-В-0,3/15	0,080	69 000	5 520
Вода	0,346	23,51	8,1
Гиперпластификатор «СТАСЕМЕНТ 2280»	0,007	146 200	1 023,4
Микрокремнезем	0,216	9000	1 944
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона партии №37 серии II:			12 403,3

Таблица 3.17 – Стоимость материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> мелкозернистого фибробетона партии №38 с металлической фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н	0,499	6 500	3 243,5
Камский песок	0,998	650	648,7
Фибра волнового профиля ФСВ-В-0,3/15	0,110	69 000	7 590
Вода	0,344	23,51	8,1
Гиперпластификатор «СТАСЕМЕНТ 2280»	0,006	146 200	877,2
Микрокремнезем	0,215	9000	1 935
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона партии №38 серии II:			14 302,5

Таблица 3.18 – Стоимость материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> мелкозернистого фибробетона партии №39 с металлической фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н	0,504	6 500	3 276
Камский песок	1,008	650	655,2
Фибра волнового профиля ФСВ-В-0,3/15	0,146	69 000	10 074

Продолжение таблицы 3.18

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Вода	0,448	23,51	10,5
Гиперпластификатор «СТАСЕМЕНТ 2280»	0,007	146 200	1 023,4
Микрокремнезем	0,217	9000	1 953
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона партии №39 серии II:			16 992,1

Стоимость 1 м<sup>3</sup> фибробетонов (Ц : П = 1:2), IV серии с полипропиленовой фиброй, наполнителем цемента и гиперпластификатором представлена в таблицах 3.19 и 3.20.

Таблица 3.19 – Стоимость материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> мелкозернистого фибробетона партии №42 с полипропиленовой фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н	0,490	6 500	3 185
Камский песок	0,980	650	637
Волокно полипропиленовое	0,007	268 000	1 876
Вода	0,341	23,51	8
Гиперпластификатор «СТАСЕМЕНТ 2280»	0,006	146 200	877,2
Микрокремнезем	0,211	9 000	1 899
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона партии №42 серии IV:			8 482,2

Таблица 3.20 – Стоимость материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> мелкозернистого фибробетона партии №43 с полипропиленовой фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н	0,475	6 500	3 087,5
Камский песок	0,950	650	617,5
Волокно полипропиленовое	0,010	268 000	2 680
Вода	0,348	23,51	8,2
Гиперпластификатор «СТАСЕМЕНТ 2280»	0,006	146 200	877,2
Микрокремнезем	0,205	9 000	1 845
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона партии №43 серии IV:			9 115,4

Стоимость 1 м<sup>3</sup> фибробетона VI серии с отходами производства «КуйбышеАзот», наполнителем цемента и гиперпластификатором представлена в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Стоимость материалов для приготовления 1 м<sup>3</sup> мелкозернистого фибробетона партии №44 с полиамидными волокнами

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб.	Стоимость всего, руб.
Портландцемент «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н	0,513	6 500	3 334,5
Камский песок	1,026	650	667
Полиамидные волокна	0,007	120 000	840
Вода	0,354	23,51	8,32
Гиперпластификатор «STACHEMENT 2280»	0,007	146 200	1 023,4
Микрокремнезем	0,221	9 000	1 989
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона партии №44 серии VI:			5 875,2

Показатели предела прочности и стоимости образцов фибробетонов с наполнителем цемента – микрокремнеземом и гиперпластификатором при соотношении Ц : П = 1:2 от количества фибры представлены в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Показатели предела прочности и стоимости образцов фибробетонов с наполнителем цемента и гиперпластификатором при Ц : П = 1:2 от количества фибры

№ партии	Количество фибры, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа		Стоимость, руб.
		при сжатии R <sub>сж</sub>	при изгибе R <sub>изг</sub>	
Ц : П = 1:2				
Металлическая фибра				
37	80	46,8	7,3	12 403,3
38	110	47,4	7,7	14 302,5
39	146	50,1	7,9	16 992,1
Полипропиленовая фибра				
42	7	46,1	7,1	8 482,2
43	10	45,3	7,0	9 115,4
Полиамидное волокно				
44	7	50,3	7,5	5 875,2

Из сравнения себестоимости фибробетонов серий II, IV и VI видно, что наиболее экономичным является фибробетон с отходами производства – полиамидным волокном. По свойствам данный фибробетон не уступает, а даже превышает прочностные характеристики образцов фибробетона с полипропиленовым фиброволокном и согласно расчетов стоимости является

экономически эффективным, так как стоимость на 35% ниже стоимости фибробетона на полипропиленовом волокне данного состава.

Фибробетон с металлическим фиброволокном имеет высокие прочностные характеристики и высокую стоимость в сравнении с обычным бетоном. Несмотря на высокую стоимость данного фибробетона, он пользуется спросом, за счет высоких физико – механических свойств и чаще всего используется в строительстве для изготовления фундаментов под оборудование и наливных полов промышленных зданий. Высокая стоимость данного фибробетона компенсируется долговечностью материала.

Как свидетельствуют данные, можно получить наиболее выгодные фибробетоны с использованием отходов промышленного производства за счет снижения себестоимости, не снижая при этом прочностные характеристики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов проведенных экспериментальных исследований следуют следующие выводы:

1. Проведено комплексное исследование основных физико – механических свойств самоуплотняющегося мелкозернистого фибробетона с использованием металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства. Получены значения предельной прочности при сжатии и изгибе мелкозернистых самоуплотняющихся фибробетонов в различном возрасте.

2. Проведено сравнение прочностных характеристик фибробетонов, изготовленных с использованием металлической фибры, полипропиленового и полиамидного волокна. Фибробетон с металлической фиброй имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с характеристиками фибробетона на полипропиленовом фиброволокне (в среднем на 4 – 8%).

Экспериментально установлено, что прочность при сжатии фибробетона с использованием полиамидных волокон в 28 – суточном возрасте на 8,3% выше по сравнению с прочностью фибробетона на полипропиленовом волокне.

3. Получены экспериментальные зависимости прочностных характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся фибробетонов в зависимости от возраста. Фибробетон с металлической фиброй в 7 суток набирает прочность в среднем 70% от марочной.

Фибробетон состава Ц : П = 1:1,43 (армирование полипропиленовой фиброй – 7 кг/м<sup>3</sup>) в течение 7 суток набирает 71% от марочной прочности в возрасте 28 суток, а фибробетон данного состава с армированием в количестве 10 кг/м<sup>3</sup> – 65% от марочной прочности. С уменьшением количества цемента в составе фибробетонной смеси (Ц : П = 1:2) прочность фибробетона в течение 7 суток набирается медленнее – в пределах 58% – 62% от прочности в 28 суток.

Фибробетон на полиамидном волокне в возрасте 7 суток набирает прочность в среднем 70% от марочной.

4. Разработан оптимальный состав мелкозернистых самоуплотняющихся фибробетонов с использованием микронаполнителя и гиперпластификатора на основе поликарбоксилата, что позволяет сократить расход цемента в среднем на 20% при одновременном улучшении физико – механических характеристик фибробетонов.

5. Экспериментально установлено, что самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны для монолитных конструкций (классом не ниже В35) могут быть изготовлены из доступных в регионе материалов: цемента, природного песка, микронаполнителя цемента, гиперпластификатора «STACHEMENT 2280» на основе поликарбоксилатов и металлического или пропиленового фиброволокна. Данный фибробетон отличается повышенной удобоукладываемостью и технологичностью. При этом прочностные свойства полученного фибробетона улучшены введением в него микронаполнителя цемента – микрокремнезема.

6. Технико – экономические расчеты показывают, что наиболее экономичным является фибробетон с отходами производства – полиамидным волокном. По свойствам данный фибробетон не уступает, а даже превышает прочностные характеристики образцов фибробетона с полипропиленовым фиброволокном (в среднем на 5 – 8%) и согласно расчетов стоимости является экономически эффективным, так как стоимость материалов на 35% ниже стоимости материалов фибробетона на полипропиленовом волокне данного состава.

Фибробетон с металлическим фиброволокном имеет высокие прочностные характеристики и высокую стоимость в сравнении с обычным бетоном. Не смотря на высокую стоимость данного фибробетона, он пользуется спросом, за счет высоких физико – механических свойств и чаще всего используется в строительстве для изготовления фундаментов под оборудование и наливных полов промышленных зданий. Высокая стоимость данного фибробетона компенсируется долговечностью материала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2006. – 8с.
2. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2018. – 14с.
3. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2018. – 19с.
4. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М. : Стандартинформ, 2018. – 32с.
5. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. М. : Стандартинформ, 2013. – 11с.
6. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2015. – 28с.
7. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2015. – 11с.
8. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2006. – 26с.
9. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ Методы физико – механических испытаний. М. : Стандартинформ, 2018. – 55с.
10. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава. М. : Стандартинформ, 2006. – 7с.
11. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2017. – 14с.



12. ГОСТ 12730.0-78. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. М. : Стандартинформ, 2007. – 3с.
13. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. М. : Стандартинформ, 2018. – 16с.
14. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М. : Минрегион России. 2013. – 175с.
15. Баженов, Ю.М., Фаликман, В.Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы I Всероссийской конференции. – М., 2001. – 91 – 101 с.
16. Баженов, Ю.М. Новому веку – новые эффективные материалы и технологии / Ю.М. Баженов // Строительные материалы, оборудование и технологии XXIв. – 2001. – №1. – С. 12 – 13.
17. Баженов, Ю.М. Технология бетонов XXI века / Ю.М. Баженов // Академические чтения РААСН. Новые научные направления строительного материаловедения. Часть 1. – Белгород, 2005. – С. 9 – 20.
18. Баженов, Ю.М. Многокомпонентный мелкозернистый бетон для высотного строительства / Ю.М. Баженов // Сборник докладов. II Международный симпозиум по строительным материалам КНАУФ для СНГ «Современное высотное строительство. Эффективные технологии и материалы». – М., 2005. – С. 7 – 73.
19. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков // Теория и практика. 2–е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
20. Богданова, Е.Р. Экспериментальные исследования бетона, дисперсноармированного синтетической полипропиленовой фиброй / Е.Р. Богданова // Известия Петербургского университета путей сообщения 2015 – №2 (43). – С. 91 – 98.

21. Ведищев, К.А. Фибробетон – строительный материал XXI века / К.А. Ведищев // БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород. Научно – практический электронный журнал Аллея Науки №15 2017. С. 52 – 66.
22. Волков, И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве / И.В. Волков // Строительные материалы. – 2005. – №6. – С. 27 – 29.
23. Волокно и жгут полиакрилонитрильные «Нитрон – С»: ТУ РБ 300041455.027-2007 [Электронный ресурс] : ОАО «Нафтан», завод «Полимир». – URL: <http://www.polymir.by/sale/NitronC> (дата обращения: 24.09.2018).
24. Волокно и жгут полиакрилонитрильные «Нитрон–Д»: ТУ РБ 300041455.015-2008 [Электронный ресурс] : ОАО «Нафтан», завод «Полимир». – URL: <http://www.polymir.by/index.phtm> (дата обращения: 24.09.2018).
25. Ключев, С.В. Фибробетон на техногенном песке КМА и композиционных вяжущих для промышленного и гражданского строительства / С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, А.В. Ключев // Белгород; Изд – во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – 124 с.
26. Ключев, С.В. Фибробетон для тяжелонагруженных полов промышленных зданий: монография / С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, А.В. Ключев, А.В. Гинзбург, С.А. Казлитин // Белгород: Изд – во БГТУ, 2013. – 116 с.
27. Коротких, Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии) / Д.Н. Коротких // Монография. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. – 141 с.
28. Лобанов, И.А. Особенности структуры и свойства дисперсно – армированных бетонов //И.А. Лобанов / Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов. – Л., 1986. – С. 3 – 10.
29. Морозов, В.И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко // – СПб. : СПбГАСУ, 2014. – С. 189 – 196.

30. Перепечко, С. А. Фибробетон и его использование в северных регионах России / С.А. Перепечко // – Молодой ученый. – 2017. – №2. – С. 185 – 187.
31. Прокофьева, Ю.А. Самоуплотняющиеся фибробетоны для монолитных конструкций / Ю.А. Прокофьева, В.Н. Шишканова // Наука и образование: новое время. 2019. № 2 (31). С. 99 – 106.
32. Прокофьева, Ю.А. Свойства и особенности фибробетонов / Ю.А. Прокофьева, В.Н. Шишканова // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом: Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. №5. г. Екатеринбург. – НН: ИЦРОН, 2018. – С. 57 – 60.
33. Пухаренко, Ю.В. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры / Ю.В. Пухаренко, У.Х. Макдеев, В.И. Морозов и др. // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 31 (50). – С. 132 – 136.
34. Пухаренко, Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов // Вестник МГСУ. – 2014. №3. – с. 189 – 196 .
35. Пухаренко, Ю.В. Железобетонные изделия и конструкции: Научно – технический справочник / Ю.В. Пухаренко, Ю.М. Баженова, В.Т. Ерофеева // – СПб: НПО «Профессионал», 2013. – 1045 с.
36. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография – М.: Издательство АСВ, 2004. – с. 201.
37. Соловьёв, В. Г. Эффективность применения различных видов фибры в бетонах / В. Г. Соловьёв, Е. А. Шувалова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 09 (63) Часть 3. – С. 78 – 81.
38. Талантова, К.В., Михеев, Н.М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных

конструкций / К.В. Талантова, Н.М. Михеев // – Ползуновский вестник. – 2011. – №1. – С. 194 – 199.

39. Черепанова, Е.Е., Полетаева, Е.С. Новшества в строительстве: Фибробетон / Е.Е. Черепанова, Е.С. Полетаева // Статья в сборнике трудов конференции. Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. – Самара, 2013. – С. 42 – 46.

40. Aarup, B., «Fibre Reinforced High Performance Concrete for Precast Applications» Proceedings of the Second International Symposium on Prefabrication, 17 – 19 May 2000, Helsinki, Finland, Concrete Association of Finland, pp. 173 – 178.

41. Bindiganvile, V., Bantha, N., and Aarup, B., «Impact Response of Ultra-High – Strength Fiber – Reinforced Cement Composite» ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 6, November – December 2002, pp. 543 – 548.

42. Uzawa, T. et al., «Evaluation of Structural Performance of Ultra High Performance Concrete» Proceedings of the First FIB Congress, Osaka, 2002, pp. 77 – 82.

43. Ille, K. and Parra – Montesinos, G., «Effect of Beam Size, Casting Method, and Support Conditions on Flexural Behavior of Ultra – High-Performance Fiber – Reinforced Concrete» ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 3, May – June 2012, pp. 379 – 388.

44. Wille, K., Naaman, A.E., and El – Tawil, S., «Optimizing Ultra – High – Performance Fiber – Reinforced Concrete» Concrete International, Vol. 33, No. 9, September 2011, pp. 35 – 41.