

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

На правах рукописи



СТУРОВА ВИКТОРИЯ АНДРЕЕВНА

**СТАЛЕФИБРОБЕТОН С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ МЕСТНЫХ
ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Бондарев Борис Александрович

Липецк – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА.....	15
1.1 Причины, вызвавшие появление сталефибробетона в промышленном, гражданском и транспортном строительстве	15
1.2 Современное состояние и проблемы в исследованиях физико- механических свойств СФБ.....	17
1.3 Разнонаправленность фибровой арматуры.....	19
1.4 Особенности технологии сталефибробетона, учитываемые при проектировании сталефибробетонных конструкций.....	23
1.5 Существующие методы расчета элементов конструкций из сталефибробетона.....	26
1.5.1 Сжатие бетона, армированного стальными фибрами.....	26
1.5.2 Расчет элементов из сталефибробетона при растяжении.....	28
1.5.3 Расчет сталефибробетонных элементов при изгибе.....	30
1.5.4 Определение деформаций сталефибробетона.....	31
1.6 Перспективы использования высокопрочного шлакопемзабетона в качестве исходной матрицы для дальнейшего дисперсного армирования.....	33
1.7 Использования песка из отсева дробления шлакового щебня.....	34
1.8 Вывод по главе 1.....	35
2 ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ СФШБ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МЕСТНЫХ	

ПРОИЗВОДСТВ.....	36
2.1 Лабораторное испытательное и регистрирующее оборудование.....	36
2.2 Материалы.....	41
2.2.1 Свойства исходных пористых заполнителей.....	41
2.2.2 Основные свойства цемента.....	44
2.2.3 Стальная фибра.....	44
2.3 Методики экспериментальных исследований.....	46
2.3.1 Методика подбора состава мелкозернистого шлакопемзобетона.....	46
2.3.2 Методика определения модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона.....	47
2.3.3 Методика определение расслаиваемости и водоотделения растворной смеси на основе отсева дробления ЛШЩ.....	48
2.3.4 Методика определения оптимального зернового состава мелкого заполнителя.....	49
2.3.5 Методика проектирования оптимального состава мелкозернистого сталефибробетона на основе отходов местных производств.....	51
2.3.6 Методика определения приведенных коэффициентов ориентации фибр.....	54
2.3.7 Методика исследований неоднородности армирования.....	56
2.3.7.1 Методика определения степени расслаиваемости фибр.....	56
2.3.7.2 Методика исследования сечений элементов по распилам...	58
2.3.8 Методика исследования анкеровки фибры в бетоне.....	59
2.4 Методики расчета прочности СФШБ.....	60
2.4.1 Методика расчета прочности СФШБ при сжатии на основе теории трехосного сжатия.....	60
2.4.2 Методика определения предела прочности при растяжении.....	64
2.5 Выводы по главе 2.....	67

3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СФБ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МЕСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ.....	69
3.1	Исследования основных физико-механических свойств конструктивного шлакопемзобетона.....	69
3.2	Определение модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона.....	72
3.3	Результаты испытаний по определению влияния крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси.....	73
3.4	Экспериментальные исследования плотности упаковки фибры.....	75
3.5	Исследование водопотребности смеси матрицы бетона.....	76
3.6	Исследование водопотребности фибробетонной смеси.....	79
3.7	Определение приведенных коэффициентов ориентации фибр.....	80
3.8	Исследование степени расслаиваемости фибробетонной смеси.....	83
3.8.1	Степень расслаиваемости фибробетонной смеси в стандартной форме.....	83
3.8.2	Определение степени расслаиваемости смеси по высоте сечения с использованием методики распила образцов после испытаний на изгиб.....	84
3.9	Определение характеристики сцепления фибр с бетоном.....	86
3.10	Экспериментальное определение прочностных и деформативных характеристик СФШБ.....	88
3.11	Результаты экспериментальных исследований прочности СФШБ элементов при изгибе с возможной неоднородностью фибрового армирования.....	92
3.12	Выводы по главе 3.....	94
4	АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА СТАЛЕФИБРОШЛАКОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ПРОЧНОСТЬ СФШБ.....	95
4.1	Анализ результатов исследований составляющих бетонной	

матрицы.....	95
4.1.1 Рекомендации по подбору оптимальной гранулометрии шлакового песка.....	95
4.1.2 Анализ плотности упаковки фибры.....	96
4.1.3 Влияние технологии изготовления на степень расслаиваемости фибр.....	99
4.2 Контроль и корректировка подобранного состава СФШБ.....	99
4.3 Анализ результатов испытаний на сжатие и растяжение образцов из СФШБ.....	107
4.3.1 Результаты испытаний на сжатие.....	107
4.3.2 Результаты испытаний на растяжение.....	109
4.3.3 Прочность изгибаемого элемента при неравномерности распределения фибр по высоте сечения.....	111
4.4 Выводы по главе 4.....	115
5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ.....	116
5.1 Эффективность сталефибробетонных конструкций.....	116
5.2 Структурная схема создания и реализации результатов исследований.....	116
5.3 Техничко-экономическое обоснование применения исследуемых материалов в конструкциях переходных плит.....	118
5.4 Проектирование оптимальных вариантов аэродромных покрытий.....	121
5.5 Рекомендации по изготовлению сталефиброшлакобетонных изделий.....	125
5.6 Особенности технологии сталефибробетона, учитываемые при проектировании СФБК	126
5.7 Роторно-ударная технология изготовления фибробетонных элементов.....	131

5.8 Выводы по главе 5.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЯ.	153
Приложение А. Результаты определения основных физико-механических свойств мелкозернистого шлакопемзобетона.....	154
Приложение Б. Результаты определения влияния крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси	157
Приложение В. Экспериментальные данные водопотребности бетонной и фибробетонной смесей.....	158
Приложение Г. Плоскостное ориентирование фибры в опытных образцах.....	160
Приложение Д. Опытные и расчетные значения степени расслаиваемости фибр и времени вибрирования фибробетонной смеси.....	165
Приложение Е. Характеристики сцепления фибры с бетоном- матрицей.....	179
Приложение Ж. Опытные и расчетные значения прочностных характеристик СФШБ при сжатии и растяжении.....	181
Приложение И. Технический акт внедрения.....	187
Приложение К. Титульный лист технологического регламента по технологии производства сталефиброшлакобетона и конструкций из него.....	188
Приложение Л. Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс.....	189
Приложение М. Титульные листы объектов интеллектуальной собственности.....	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Сегодня вектор исследований в области материаловедения направлен на поиск новых путей решения увеличения долговечности и работоспособности строительных конструкций. Добиться этого можно путем создания новых материалов с заданными физико-механическими и деформативными характеристиками. На замену традиционным, постоянно используемым материалам, приходят совершенно новые композиционные материалы.

Композиты могут широко применяться во всех отраслях строительства, как при строительстве жилых и промышленных объектов, так и при строительстве элементов конструкций транспортных сооружений, вытесняя традиционные материалы. Важное значение в российских экономических и климатических условиях имеет логистика, стоимость доставки и технико-экономическое обоснование применения материала.

При изготовлении элементов конструкций транспортных сооружений в настоящее время все большее применение находят комбинированные материалы, усиленные либо волокнами (фибробетон), либо диспергированные твердыми частицами, что открывает перспективные пути их применения.

По мнению специалистов, в будущем композиты будут вытеснять традиционные металлы. Ведь композиты легче, прочнее и долговечнее. На полном жизненном цикле изделия эти материалы использовать гораздо целесообразнее. Однако есть ряд сложностей, например, не хватает базы данных по композитам.

В данной работе рассмотрен один из таких композиционных материалов – фибробетон. Так как, его применение уже и так широко известно, поэтому предлагается заменить в его составе традиционные компоненты на отходы промышленного производства и проверить целесообразность и возможность его внедрения.

В качестве отходов промышленного производства приняты пористые материалы на основе литого шлакового щебня (ЛШЩ) металлургического

предприятия ПАО «НЛМК». После дробления ЛШЩ остаются вторичные дополнительные отходы в виде шлакового песка, количество которого возрастает с каждым годом.

Так как, потребность в качественном мелком заполнителе с каждым годом возрастает, то естественно, что в промышленных районах можно осуществить замену природного кварцевого (горного) песка на песок из попутных продуктов и отходов, в частности из доменных шлаков металлургической промышленности, запасы которого в отвалах исчисляются сотнями миллионов тонн.

С экономической точки зрения использование в качестве бетонной матрицы мелкозернистого шлакобетона (МЗШБ), усиленного металлическими волокнами (фибрами), получаемыми из отходов производства (металлическая фибра – из листа, проволоки, отработавших свой ресурс тросов и канатов и т.д.) приводит к созданию конкурентоспособного материала в сравнении с традиционным бетоном – сталефиброшлакобетона (СФШБ).

Отличительной особенностью СФШБ по сравнению с обычным бетоном является эффективность работы при растягивающих усилиях после начала трещинообразования. Если обычный, неармированный бетон работает по хрупкой стадии, то фибробетон лишен этого недостатка.

Одной из проблем использования СФШБ является сложность подбора состава, так как при его разработке необходимо учитывать процент фибрового армирования, ведь одновременно с снижением хрупкости и обеспечением больших растягивающих деформаций стальная фибра, если превысит процент армирования 1,5% может просто скомкаться в составе и образовать «ежи», распределившись по матрице неравномерно, в процессе эксплуатации которой данный материал будет работать некорректно.

Как известно, эксплуатация сталефибробетонных конструкций в различных областях строительства уже показала технико-экономическую эффективность их применения. Однако, из одной задач в данной работе было доказать экономическую эффективность от внедрения отходов промышленных производств (армирующего материала и компонентов смеси) для транспортных конструкций.

Зарубежный и отечественный опыт применения фибробетона в строительных конструкциях показывает, что области использования этого материала могут быть довольно разнообразны и обширны.

Благодаря наличию фибры в составе конструкции, она лучше воспринимает воздействие динамических нагрузок, а это является очень важной характеристикой для сейсмоопасных районов. Введение в сталефибробетонную смесь отходов местных производств, таких как доменный шлак и отходы от его дробления взамен кварцевого песка, также позволят снизить стоимость готового изделия, сохранив при этом все эксплуатационные характеристики.

Об актуальности работы свидетельствует выполнение ее в соответствии с государственными программами:

1. «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года».
2. «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [77].

Степень разработанности темы исследования. Изучением процессов структурообразования и свойств фибробетонов, а также разработкой составов, в которых фигурирует армирование стальной фиброй занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Л.Г. Курбатов, И.А. Лобанов, А.П. Павлов, Ф.Н. Рабинович, В.П. Романов, Г.К. Хайдуков, Д. Н. Коротких, Д. Р. Маилян, В. Пухаренко, Ф. Ц. Янkelович, Н.Н. Черноусов, А.С. Бочарников, В.В. Галкин и др.

Все существующие научные труды и исследования, в которых фигурирует армирование стальной фиброй, направлены на предотвращение появлений трещин в конструкциях, а, следовательно, и разрушения.

В настоящее время наметился ряд способов армирования асфальтобетонных покрытий, одним из которых является дисперсное (распределение по всему сечению) армирование различными волокнами. При применения различного вида фибры также не менее важное значение имеет момент добавления ее в смесь, который влияет на схватываемость смеси и дальнейшую прочность дорожного покрытия.

Научная гипотеза. Высокая плотность упаковки тонкодисперсных частиц обеспечит плотную структуру сталефибробетона, что упростит устройство системы «гидроизоляция-водоотвод» на мостовых сооружениях и появится возможность применения сталефибробетона на основе отходов местных производств в элементах конструкций транспортных сооружений.

Цели работы. Разработка нового научно-технологического решения для области транспортного строительства, а именно, применение мелкозернистого СФШБ на основе отсевов от дробления ЛШЩ в элементах конструкций транспортных сооружений.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- разработка методики определения оптимального зернового состава песка из отсева дробления литого шлакового щебня и исследование влияния крупности шлакового песка и содержания фракции менее 0,14 мм на характеристики мелкозернистого шлакобетона (МЗШБ) - исходной матрицы сталефибробетона;
- определение возможности применения песка из отсевов дробления литого шлакового щебня ПАО «НЛМК» в качестве сырья для производства мелкого заполнителя;
- разработка и развитие теоретических и методологических основ получения фибробетона на основе отходов местных производств с заданным комплексом эксплуатационных свойств;
- исследование совместной работы строительных материалов с разными свойствами и создание, с учетом системных взаимосвязей между всеми компонентами слоистых, композитных и специальных строительных конструкций с учетом специфических требований;
- изучение соотношения фибровых волокон и заполнителя, для обеспечения необходимой подвижности и достаточной удобоукладываемости фибробетонной смеси;
- определение зависимостей, позволяющих учитывать и регулировать неравномерное распределение фибр по высоте сечений СФБК для предотвращения расслоения;

- разработка методики подбора составов и развитие технологии изготовления мелкозернистого фибробетона на основе отходов местных производств с заданными показателями качества;

- подготовка нормативной и технической документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований, промышленная апробация.

Научная новизна работы.

Получены экспериментальные зависимости характеристик шлакобетонной матрицы от крупности шлакового песка и содержания фракции менее 0,14 мм, позволяющие осуществить выбор оптимальной гранулометрии мелкого заполнителя.

Экспериментально доказана и теоретически обоснована эффективность использования сталефибробетона на основе отходов местных производств для транспортных сооружений - переходных плит и элементов мостов.

Установлены зависимости, помогающие контролировать соотношения фибровых волокон и заполнителя, для обеспечения необходимой подвижности и удобоукладываемости сталефибробетонной смеси.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в определении расчетных характеристик сталефибробетона на основе отходов местных производств, разработке методик проектирования составов мелкозернистых сталефиброшлакобетонов и прогнозировании их свойств при помощи многофакторных зависимостей.

Практическая значимость:

- разработаны рекомендации по определению оптимального зернового состава песков из отсева дробления литого шлакового щебня, позволяющие осуществлять корректировку составов с учетом возможностей принятого вида дробильного оборудования.

- разработана программа для ЭВМ «Подбор состава сталефиброшлакобетона с заданными физико-механическими характеристиками» № 2024662548;

- предложена замена плотного мелкого заполнителя в бетоне-матрице на мелкий пористый заполнитель в виде отсевов от дробления литого доменного шлакового щебня, позволяющая существенно снизить себестоимость элементов конструкций транспортных сооружений из сталефибробетона;
- предложены альтернативные элементы конструкций покрытий жестких дорожных одежд и произведен их расчет с применением исследуемых материалов;
- результаты экспериментальных исследований и теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, применяются кафедрой «Строительного материаловедения и дорожных технологий» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы были применены математико-статистические методы с использованием ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на современной измерительной аппаратуре с использованием стандартных методик.

Степень достоверности работы. Степень достоверности выносимых на защиту результатов работы подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований и апробацией их в реальном времени.

Внедрение результатов.

Внедрение результатов осуществлялось при разработке рабочего проекта на ремонт мостового перехода через реку Птань на км 0+700 автомобильной дороги Плахово – примыкание к автомобильной дороге Авдулово– Воскресенское в Данковском районе Липецкой области. Разработан технологический регламент по технологии производства сталефиброшлакобетона и конструкций из него.

Апробация работы.

Основные результаты работы были доложены на Всероссийском научно-техническом конкурсе молодежи НТТМ-2020, Международных научно-практических конференциях, II – V Всероссийских научных конференциях «Современные проблемы материаловедения» (Липецк, 2021 – 2024 гг.), Всероссийском конкурсе «Инженер года – 2023».

Положения, выносимые на защиту:

- результаты комплексных экспериментальных исследований сталефибробетона на основе отходов местных производств - теоретические и методологические основы получения композита с заданным комплексом эксплуатационных свойств;
- результаты исследования совместной работы стальной фибры в матрице фибробетона с применением отходов местных производств - отсеков дробления литого доменного шлака ПАО «НЛМК»;
- закономерности влияния соотношения фибровых волокон и заполнителя на подвижность и удобоукладываемость фибробетонной смеси;
- закономерности влияния времени виброуплотнения, жесткости и геометрических размеров конструкции и стальных фибровых волокон на распределение их по объему, предотвращение расслоения СФБК;
- результаты технико-экономической оценки эффективности применения мелкозернистого сталефибробетона на основе отходов местных производств в элементах конструкций транспортных сооружений.

Публикации.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 30 печатных работах, из них 13 статей в изданиях, входящих в рекомендованный ВАК перечень; зарегистрированы 2 изобретения и получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности использования отходов промышленного производства ПАО «НЛМК» для возможности их применения в элементах конструкций транспортных сооружений с целью повышения долговечности. Осуществлен комплекс лабораторных исследований с последующей обработкой и анализом полученных данных. Принято участие в апробации полученных результатов работы.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 193 страницах и включает: введение, пять глав, заключение, список литературы (включающий 113 наименований) и 11 приложений, содержит 72 рисунка и 42 таблицы.

1 ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

1.1 Причины, вызвавшие появление сталефибробетона в промышленном, гражданском и транспортном строительстве

Первые предложения по армированию бетонов произвольно ориентированными отрезками тонкой стальной проволоки были сделаны в 1907-1909 гг. Некрасовым В.П. [52, 53].

Сталефибробетон (СФБ) это композитный материал, который получил широкое распространение в строительстве. Благодаря совокупности высокопрочной бетон-матрицы и стальной фибры материал предлагает несколько решений в сфере строительства, ремонта и реконструкции гражданских и транспортных сооружений и обладает уникальными характеристиками: повышенными прочностью при сжатии и растяжении, модулем упругости.

Использование бетонов, армированных стальными фибрами, позволяет исключить из изготавливаемой конструкций значительную часть традиционной стержневой арматуры и заменить ее фиброй, вводимой в бетон при его приготовлении в бетоносмесителе или непосредственного введения (зонного или послойного) в форму, в которой изготавливается конструктивный СФБ.

Не менее эффективно применение сталефибробетона при заливке фундаментов в почву, где грунтовые воды находятся вблизи от поверхности, т. к. здесь необходимы повышенные водонепроницаемость и трещиностойкость.

В последние годы значительно осложнились условия работы дорожных покрытий вследствие роста интенсивности движения транспортных средств. Дорожные одежды, сконструированные и построенные в соответствии с требованиями нормативных документов, часто не выдерживают заданного срока службы. Основным видом покрытий на автомобильных дорогах являются

асфальтобетонные (доля которых составляет 80%), поэтому повышение их долговечности является первоочередной задачей.

Элементы конструкций транспортных сооружений (автомобильные дороги, мосты, путепроводы, эстакады, мостовые переходы и т.д.) в процессе своего жизненного цикла испытывают многократное приложение нагрузок (более $2 \cdot 10^6$) циклов, а традиционные материалы, применяемые в этой отрасли (асфальтобетон, обычный и предварительно напряженный бетон) не всегда справляются с такого рода нагрузками.

Высокий уровень урбанизации и развитие транспортной инфраструктуры способствуют улучшению архитектурно-планировочных решений в мостостроении. Кроме того, ежегодно требования к проектированию и эксплуатации транспортных сооружений возрастают по ряду причин, среди которых повышение временной нагрузки на сооружение, рост интенсивности движения, использование противогололедных реагентов на дорогах. В связи с этим несущая способность сооружений, построенных 20–30 лет назад, оказывается недостаточной: конструкциям требуется усиление.

Мировые достижения в композитных решениях связаны с появлением системы внешнего армирования. Ремонт существующих опор мостов, которые пришли в негодность, осуществляется без остановки движения транспорта. Вывод из строя этих сооружений, как известно, влечет за собой серьезные дорожно-транспортные проблемы. Данные системы внешнего армирования идеально сочетают в себе прочностные характеристики композиционных материалов, благодаря чему проводить ремонт можно с минимальными затратами.

Известны многочисленные примеры применения сталефибробетона за рубежом [27, 103-107]: автомагистрали, шоссе, стоянка для танков, стоянка для самолетов и т.д.

Сталефибробетонные перекрытия имеют достаточно широкую номенклатуру изделий и применение. Для их изготовления используется преимущественно мелкозернистый бетон класса В20, армированный стальной фиброй. Применение сталефибробетона в бункерах обеспечивает значительную экономию бетона - 25-

55%, а также снижает трудозатраты на их производство до 50% по сравнению с бункерами из железобетона [18].

Одной из существенных проблем при строительстве транспортных сооружений является устройство системы «гидроизоляция-водоотвод» [4, 41-44, 64, 65]. Частично решить эту проблему возможно с применением сталефибробетона, который обладает гидрофобными свойствами. Применение СФБ в элементах конструкций транспортных сооружений тоже является актуальным [55, 80, 81].

1.2 Современное состояние и проблемы в исследованиях физико-механических свойств СФБ

Фибры, применяемые для армирования бетона, характеризуются геометрическими размерами (длиной l , диаметром d), формой поверхности, модулем упругости E_f и пределами прочности σ_f или текучести σ_{ft} . Они могут иметь различные поперечные сечения (круг, квадрат, прямоугольник, овал).

В нашей стране и за рубежом наиболее распространены фибры, имеющие сечение в виде круга с $d = 0,25 - 2,0$ мм или в виде прямоугольника с размерами сторон $(0,15-0,7) \times (0,25 - 1,0)$ мм. Длина фибр, как правило, составляет от 10 до 250 мм.

Основным числовым параметром, определяющим геометрические размеры фибр, являются отношение l/d (d – диаметр круга, площадь которого равна площади поперечного сечения фибры, эквивалентный диаметр). Это соотношение колеблется от 30 до 200.

Круглые фибры, как правило, изготавливаются из холодноотянутой стальной проволоки с пределом текучести (σ_{ft}) от 350 до 1000 МПа. В процессе изготовления обычно выполняется профилирование их поверхности. Плоские фибры нарезаются из стального листа, имеющего σ_{ft} от 300 до 800 МПа. Модуль

упругости (E_ϕ) плоских и круглых фибр может быть в пределах $E_\phi = (1,6-2,1) \cdot 10^5$ МПа.

Выбранный состав и сочетание исходных компонентов оказывают значительное влияние на технологию изготовления фибробетона. Чрезвычайно важно сохранить правильную ориентацию фибровых волокон в бетонной матрице и одновременно с тем, обеспечить равномерное распределение волокон в бетонной смеси.

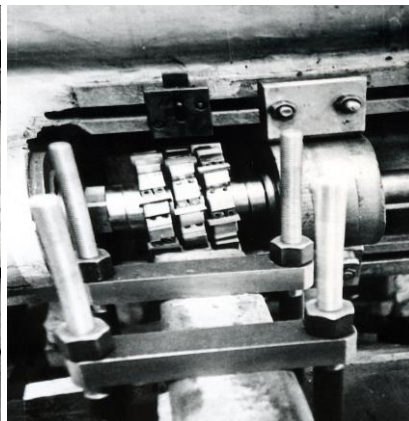
Одной из проблем в технологии приготовления фибробетона является – подвижность, а также недостаточная удобоукладываемость, возникающая на практике при работе с фибробетоном, армированным кусками стальной проволоки. Для избежания вышеперечисленных проблем, необходимо, контролировать соотношение фибровых волокон и заполнителей.

Анализ экспериментальных исследований, показал, что эффективность работы волокон разного диаметра зависит от объемного насыщения.

Стальные волокна можно изготавливать разными способами из разных материалов в соответствии с рисунком 1.1.



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Станки для производства стальной фибры: а) рубка стального листа или ленты; б) фрезерование металлического сляба; в) рубка проволоки

1.3 Разнонаправленность фибровой арматуры

Разнонаправленность фибровой арматуры в сталефибробетонных конструкциях (СФБК) связана с уменьшением числа армирующих стержней в сечениях, по сравнению с однонаправленным армированием, кроме того, это является причиной несовпадения направления армирующих стержней с направлением растягивающего внешнего усилия, что приводит к уменьшению степени использования прочностных свойств стали по сравнению с однонаправленным армированием.

Связь разнонаправленности фибр с их количеством в сечении в простейшем виде изучалась Л.Г. Курбатовым и А.А. Купцовым применительно к случаю расположения всех фибр в одной плоскости (в тонкостенных конструкциях, когда длина фибры значительно превышает толщину стенки). Рассматривается элемент с равновероятной ориентацией фибр, показанный на рисунке 1.2. Определяется число фибр в элементе А-А, нормальном к направлению внешнего растягивающего усилия.

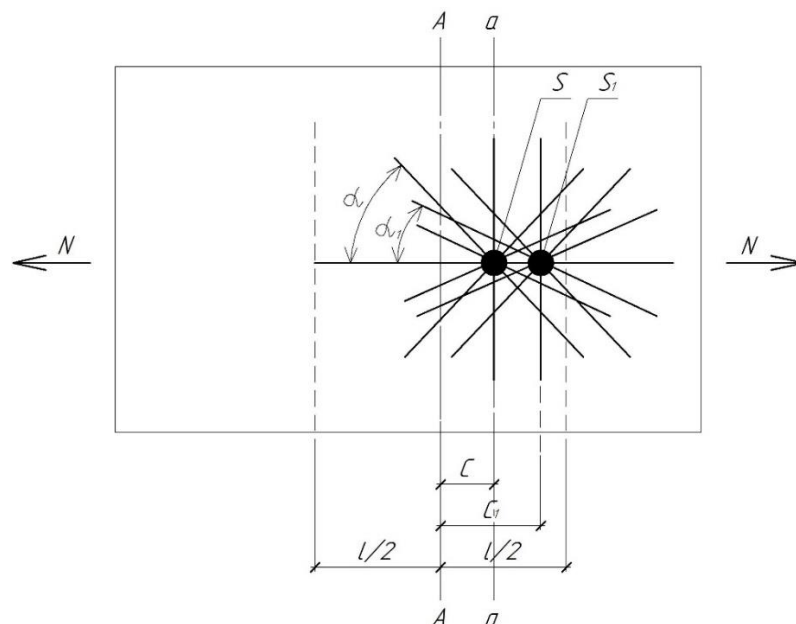


Рисунок 1.2 – Число пересечений фибр плоскостью при их равновероятной плоскостной ориентации

Для определения той части фибр в элементе, которая пересечется с А-А, достаточно рассмотреть зону, ограниченную линиями, находящимися на расстоянии $l/2$ от А-А, поскольку фибры, середины которых расположены от А-А дальше, чем на $l/2$ с А-А пересечься не могут.

В ограниченной указанным образом зоне на произвольном расстоянии от А-А проводится прямая а-а на расстоянии C . Все фибры, середины которых оказались на а-а, условно передвигаются в точку (это не влияет на число пересечений). Для рассматриваемой группы фибр (с серединами на а-а) отношение числа фибр, пересекшихся с А-А, к общему их числу равно отношению угла α к $\pi/2$, или отношению

$$\frac{n_{\text{пер}}}{n_{\text{общ}}} = \frac{\arccos \frac{c}{l/2}}{\pi/2}, \quad (1.1)$$

где $n_{\text{пер}}$ – количество фибр пересекаемых расчетной плоскостью, шт;

$n_{\text{общ}}$ – общее количество фибр в объеме, ограниченном линиями, шт.

Для других групп фибр, центры которых попадут на прямые, отстоящие от А-А на расстоянии, отличные от C , например, C_1 , соответствующие отношения будут иметь другие значения.

Отношение суммарного числа пересечений фибр А-А к общему их количеству в рассматриваемой зоне (ограниченной линиями, отстоящими на $l/2$ от А-А) получается, как результат интегрирования

$$K_g = \frac{n_{\text{пер}}}{n_{\text{общ}}} \int_0^1 \frac{\arccos K}{\pi/2} dK = \frac{2}{\pi} = 0,638, \quad (1.2)$$

где $K = \frac{c}{l/2}$;

K_g – коэффициент ориентации, используемой в дальнейшем в расчетных формулах прочности сталефибробетона на растяжении;

$n_{\text{общ}}$ – общее количество фибр в объеме, ограниченном линиями, отстоящими на $l/2$ от А-А, и определяется как:

$$n_{\text{общ}} = \frac{F_{\delta} l \mu}{\pi d^2 l/4} = \frac{4 \mu F_{\delta}}{\pi d^2}, \quad (1.3)$$

где μ – коэффициент фибрового армирования;

F_0 – площадь рассматриваемого бетонного образца, см²;

d – эквивалентный диаметр фибр, мм.

Откуда видно, что $n_{общ}$ а следовательно, $n_{пер}$ не зависит от длины фибр.

Для случая равновероятной ориентации фибр по трем направлениям из аналогичных приведенным рассуждений следует, что коэффициент ориентации равен отношению соответствующей поверхности шарового сегмента к поверхности полусферы - в этом случае 0,5.

Таким образом, для трех практически наиболее важных случаев ориентации фибр: одноосной, плоскостной и трехосной коэффициенты ориентации равны соответственно 1,0; 0,638; 0,5.

В реальных конструкциях, вследствие влияния таких технологических факторов, как используемый метод формирования конструкций, воздействия сил гравитации, стеснения ориентации фибр опалубкой, коэффициент ориентации может принимать промежуточные между приведенными значения. Для последнего из перечисленных факторов (стеснение опалубкой) В.М. Косаревым на основе решения задачи Бюффона для стесненных условий предложена следующая формула определения K_g в сечениях, наклонных под различными углами α к продольной оси элемента

$$K_g = (0,64 + \alpha l/b)(0,79 + 0,15 l/h), \quad (1.4)$$

где α – угол наклона сечения к продольной оси элемента;

b – ширина сечения, м;

h – высота сечения, м;

l – длина фибр, м.

При этом $(0,79 + 0,15 l/h)$ принимается равным не более 1.

Таблица 1.1 – Значение коэффициента α , определяемого в зависимости от угла наклона

Угол наклона	0°	20°	40°	60°	70°	80°	90°
<i>коэффициент, определяемый в зависимости от угла наклона</i>							
α	- 0,37	- 0,24	- 0,02	+ 0,17	+ 0,24	+ 0,28	+ 0,29

С учетом коэффициента K_g общая площадь фибр в расчетном сечении будет

$$F^{\Phi} = F\delta\mu K_g, \quad (1.5)$$

где δ – расстояние между волокнами, мм.

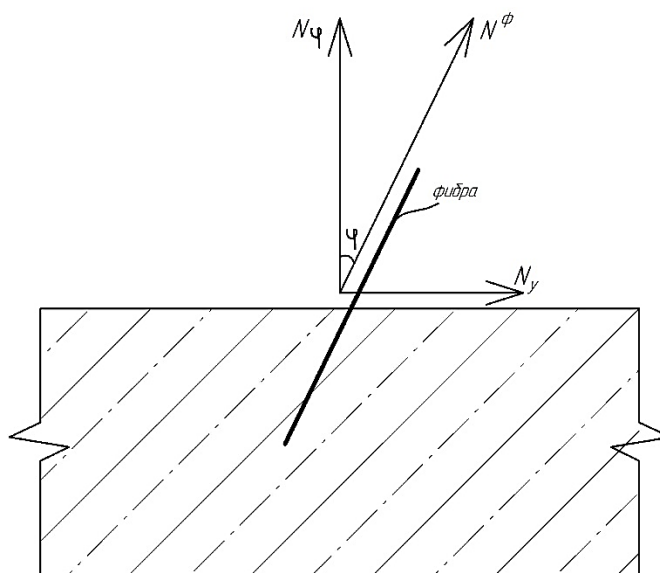


Рисунок 1.3 – Схема работы фибр, ориентированных под углом к внешней нагрузке

Как упомянуто выше, влияние разнонаправленности армирования на прочность сталефибробетона при растяжении проявляется еще и в связи с несовпадением направления фибр с направлением внешнего растягивающего усилия.

Из рисунка 1. 3 видно, что

$$N_{\varphi} = N^{\Phi} \cos \varphi, \quad (1.6)$$

где N^{Φ} – полное усилие, воспринимаемое одной фиброй при ее выдергивании или разрыве силой, приложенной вдоль ее оси, Н;

N_{φ} – составляющая N^{Φ} , направленная вдоль внешнего усилия уравнивающая часть последнего, приходящаяся на рассматриваемую фибру, Н;

φ – угол между направлением внешнего усилия.

Составляющие усилий, действующие в плоскости расчетного сечения N_y , взаимоуравновешиваются.

1.4 Особенности технологии сталефибробетона, учитываемые при проектировании сталефибробетонных конструкций

Нельзя запроектировать практически осуществимую, тем более отвечающую требованию минимальных затрат, конструкцию без учета технологических особенностей используемого материала и имеющихся в распоряжении средств для реализации принимаемого конструктивного решения. Это относится к конструкциям из любых материалов, а к сталефибробетонным в особенности, поскольку в процессе изготовления в незатвердевшем состоянии сталефибробетон представляет собой взвесь стальных стерженьков-фибр в бетоне. Физические свойства фибр и бетона различны, а свойства матрицы находятся в существенной зависимости от их взаимовлияния и от влияния технологических воздействий. В первую очередь это относится к распределению и ориентации фибр в конструкции, являющихся, как было показано выше, важнейшими характеристиками, определяющими прочность и другие свойства СФБК.

Рассматриваемое направление применения железобетонных конструкций находится еще в начале пути своего развития, поэтому пока используется лишь простейший способ изготовления, называемый методом перемешивания, не позволяющий во многих случаях реализовать в полной мере возможности по рационализации технологии и конструктивных форм, открывающихся при прерывистом армировании бетона.

В числе просматривающихся перспектив развития этого направления можно назвать, например, электромагнитную ориентацию фибр, которая позволит ориентировать арматуру в строгом соответствии с направлениями возникающих в сечениях конструкции усилий; зонную укладку фибр и бетона в соответствии с величинами усилий, возникающих в различных сечениях конструктивных элементов; мероприятия по увеличению сцепления фибр с бетоном путем увеличения как анкерующей способности бетона, так и за счет применения эффективного профиля поверхности фибр; другие мероприятия, отвечающие реализации преимуществ принципа прерывистого армирования. Однако, на сегодня достаточно обоснованные и проверенные рекомендации могут быть даны только применительно к методу перемешивания.

Сущность метода перемешивания заключается в том, что в работающий смеситель с готовым бетоном засыпается фибровая арматура. Полученная таким образом смесь бетона с фибрами укладывается в опалубку (форму), уплотняется.

Основной задачей приготовления смеси бетона с фибрами является получение смесей с достаточно равномерным распределением фибр в бетоне. Этому может препятствовать образование в смеси комков фибр – «ежей» (флоккул). В статьях Л.Г. Курбатова и А.А. Купцова указываются причины комкования фибр: связность больших масс фибр, проявляющаяся при их сравнительно большой относительной длине, перенасыщение смеси фибрами.

Получение качественных смесей с равномерным распределением фибр не гарантирует такого же распределения фибр в конструкции. Поскольку в стадии изготовления СФБК фибры взвешены в незатвердевшем бетоне, их распределение и ориентация могут меняться в зависимости от гранулометрии и реологических характеристик незатвердевшей смеси, с одной стороны, и интенсивности технологических воздействий при транспортировании, укладке и уплотнении смеси – с другой.

При вибрационном уплотнении смесей бетона с фибрами вследствие большой разницы в средних плотностях бетона и стали под воздействием гравитационных сил может происходить опускание фибр в нижнюю часть формы.

При этом они стремятся занять более устойчивое для них горизонтальное положение. Расслоение может быть частичным или полным. В последнем случае в нижней части формы оказываются все фибры, занимая при этом объем, соответствующий их насыпной плотности. В верхней зоне изделия фибры в этом случае отсутствуют. Коэффициент армирования, сформировавшегося таким образом слоя и высота слоя могут быть определены из формул ниже:

$$\mu_{полн.}^{рассл.} = 4,5 \frac{d}{l}; \quad (1.7)$$

$$h_{полн.}^{рассл.} = 4,5 \mu_{см} h_{изд} \frac{d}{l}, \quad (1.8)$$

где $\mu_{полн.}^{рассл.}$ – коэффициент объемного армирования в слое при полном расслоении;

$h_{полн.}^{рассл.}$ – высота, в которой размещаются фибры при полном расслоении, м;

$\mu_{см}$ – коэффициент армирования смеси до ее уплотнения;

$h_{изд}$ – высота изделия, м;

d, l – диаметр и длина используемых фибр, мм.

В литературных источниках, результатами экспериментальных исследований было установлено, что при частичном расслоении можно с достаточной точностью принять распределение опустившихся фибр равномерным по высоте, равной удвоенному расстоянию от низа формы до центра тяжести фибр. Выразив эту высоту через k_{st} , получим:

$$h_{част.}^{рассл.} = \frac{h_{изд}}{k_{st}}, \quad (1.9)$$

где k_{st} – коэффициент, характеризующий частичное расслоение смеси.

Частичное расслоение смеси характеризуется коэффициентом k_{st} , равным отношению удвоенного расстояния от низа формы до центра тяжести фибр в сечении к полной высоте изделия.

Значение k_{st} определяется по эмпирической формуле:

$$k_{st} = f(\mathcal{K}, t, d), \quad (1.10)$$

где $\mathcal{K}$ – жесткость используемого бетона, с;

t – время виброуплотнения, с;

d – диаметр фибр, мм.

На основе зависимостей (1.7), (1.8) и (1.9) имеется возможность регулировать распределение фибр по высоте сечения, т.е. решать задачи конструктивного порядка на стадии изготовления изделия. Значения k_{st} могут назначаться на стадии проектирования в зависимости от характера эксплуатационных воздействий на конструкцию.

1.5 Существующие методы расчета элементов конструкций из сталефибробетона

1.5.1 Сжатие бетона, армированного стальными фибрами

Армирование сжатых элементов стальными фибрами можно рассматривать как частный случай косвенного армирования бетона. Понятие было введено в начале века русским профессором В.П. Некрасовым [54].

Под косвенной, он понимал такую арматуру, которая не воспринимает непосредственно сжимающую нагрузку. Однако, ее наличие создает такие условия работы бетона, когда он может воспринимать нагрузку значительно большую, чем неармированный бетон. Ограничивая расширение бетона в поперечном направлении, косвенная арматура способствует созданию в бетоне объемного напряженного состояния, а именно – трехосного неравномерного сжатия вида $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Боковое стеснение оказывает действие аналогичное боковому обжатию при центральном сжатии. А.А. Гвоздев, А.Ф. Липатов, Г.А. Гениев и другие ученые, изучавшие трехосное напряженное состояние бетона пришли к выводу о значительном повышении предельных напряжений в бетоне при трехосном сжатии по сравнению с одноосным.

Линейное разложение функции

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0,$$

определяющей условие прочности бетона, которое представляет собой некоторое обобщение теории прочности Мора, учитывающее специфику прочностных и деформативных свойств бетона, и имеющей в системе координат $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ отображение параболоидом вращения, предложенное П.П. Баландиным как обобщение гипотезы Губера-Мизеса-Генки для материалов с различным сопротивлением растяжению (R_p) и сжатию (R_c), которое принимает аналитическое выражение в виде

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - (R_c - R_p)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)R_cR_p = 0.$$

При $\sigma_3 = \sigma_{max}$ и $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{об}$ приводит к выражению для бетона $\sigma_3 = R_b + 4\sigma_{об}$, хорошо совпадающему с результатами обработки экспериментальных данных.

Увеличение прочности при этом оказывается даже большим, чем при армировании стержнями, непосредственно воспринимающими нагрузку. Стальные фибры, сдерживая развитие поперечных деформаций бетона при сжатии, способствует созданию эффекта обоймы и, следовательно, сложного напряженного состояния бетона.

Кроме сталефибробетона к элементам, в которых бетон воспринимает трехосное неравномерное сжатие, можно отнести также трубобетонные элементы, элементы с армированием в виде поперечных сеток, спиралей и другими видами косвенной арматуры.

Исторически сложилось так, что расчет элементов с косвенным армированием развивался на экспериментальной основе. Формулы для определения прочности косвенно армированного бетона имеют вид эмпирических зависимостей, полученных на основе статической обработки большого числа экспериментальных данных. Совершенствование расчета идет по пути уточнения эмпирических коэффициентов по мере поступления новых экспериментальных данных. Такой путь развитие метода расчета исторически оправдан, однако возможности его, естественно ограничены. Более перспективным является получивший развитие в последнее время экспериментально-теоретический подход

к расчету железобетонных конструкций, когда решения находят, используя расчетные модели. На основе получившей такое развитие современной теории прочности бетона в условиях сложного напряженного состояния выполняется, в частности, расчет трубобетонных элементов.

Однако, для элементов с сетчатым косвенным армированием использовать аналогичный подход представляется задачей гораздо более сложной. Дело в том, что нахождение формы предельной поверхности, являющейся геометрической интерпретацией условия прочности бетона при сложном напряженном состоянии, при таком армировании значительно усложняется. В силу дискретности расположения сеток, связи, препятствующие поперечному расширению бетона распределены по высоте элемента прерывисто, что накладывает дополнительные условия при отыскании формы предельной поверхности, которая, согласно современным представлениям, является сложной комбинированной поверхностью, состоящей из неротационного конуса и неротационного двуполостного гиперboloида.

1.5.2 Расчет элементов из сталефибробетона при растяжении

Разработанное для расчета композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, «правило смесей», в измененном виде применяется некоторыми исследователями при расчете сталефибробетона. В соответствии с этим правилом нагрузка распределяется между матрицей и армирующими волокнами пропорционально их содержанию в композиции и модулям продольной упругости, а предельная прочность, кроме того, зависит от достигнутого уровня относительных деформаций композита ε_c , матрицы ε_m , фибр ε_χ . В случае, когда $\varepsilon_m < \varepsilon_c < \varepsilon_\chi$, предельная прочность композиционного материала

$$\sigma_\phi = \varepsilon_c \mu E_\phi + \sigma_m (1 - \mu), \quad (1.11)$$

где σ_m – напряжение в матрице, Па;

E_ϕ – модуль упругости фибры, МПа.

Для учета прерывистости фибр в работе [63] было предложено в первое слагаемое формулы (1.11) ввести коэффициент, учитывающий эффективность работы фибр, $\beta = \beta_l \cdot \beta_\theta$, где $\beta_l = 1 - l_c/l$ – коэффициент характеризующий критическую длину l_c фибр, β_θ – коэффициент, отражающий ориентацию фибр относительно направления приложения нагрузки. Дополнительно к перечисленным коэффициентам в [57-59] было предложено ввести коэффициент β_d , отражающий эффективность сцепления фибр с бетоном.

Коэффициент β_l учитывает работу фибр при выдергивании их из бетона. Согласно [57-59] $\beta_l = 1 - \alpha l_c / 0,5l$, где α – зависит от объема фибр и их механических характеристик.

Коэффициент β_θ в зависимости от подхода к расчету имеет значения: при пространственной (трехосевой) ориентации в работе [62] приводится $\beta_\theta = 0,405$, а в [63], $\beta_\theta = (0,333; 0,444; 0,895)$ в зависимости от расположения фибры по отношению к трещине; при плоском ориентировании, $\beta_\theta = 0,637$. Развивая подход «правила смесей» в формулу (1.11) вводятся коэффициенты, учитывающие различные факторы взаимодействия фибр с бетоном. В работе [63] для определения сопротивления фибробетона при растяжении предложена формула:

$$R_{fp} = \left[1 + 0,015 V_f (l/d)^{1,5} \right] \sigma_m, \quad (1.12)$$

где V_f – процентное содержание фибр в бетоне.

Основываясь на методе «правила смесей» Лобанов И.А. в работе [46] предлагает формулы для определения прочности фибробетона при растяжении с учетом влияния технологических его особенностей изготовления. В результате в расчетные формулы вводятся коэффициенты, учитывающие влияние напряженного состояния образца, сцепление фибр с бетоном, прочность и размеры контактной зоны бетона у поверхности фибр.

Развивая подход «правила смесей» к расчету фибробетона, Рабинович Ф.Н. предлагает в [63] определять прочность фибробетона при растяжении после образования трещин в бетонной матрице, по формуле:

$$R_{\phi p} = \beta_{\theta} K_g \overline{V}_{\phi} \sigma_{\phi}, \quad (1.13)$$

где K_g – коэффициент, определяемый соотношением между необходимой длиной заанкеривания фибр в бетоне и фактической длиной используемых фибр;

$\overline{V}_{\phi}$ – объемное содержание фибр в бетоне;

σ_{ϕ} – расчетное сопротивление фибровой арматуры при растяжении, МПа.

Из анализа формул, полученных для расчета фибробетона с использованием «правила смесей», следует, что они неизбежно включают в себя различные число коэффициентов, определяемых эмпирическим путем, а это ограничивает область их применения.

1.5.3 Расчет сталефибробетонных элементов при изгибе

Для определения прочности фибробетонных элементов при изгибе ученые Американского института бетона [105] предложили следующую формулу:

$$\sigma_c = A\sigma_m(1 - V_f) + BV_f l/d, \quad (1.14)$$

где A, B – эмпирические коэффициенты, по результатам, полученным Swamy R.N. и другими исследователями [108-113], $A = 0,97$, $B = 3,41$.

Формула (1.14) приводится к более общему виду:

$$\sigma_c = 1 + (A l/d - 1). \quad (1.15)$$

В статье [40] авторы предлагают определять прочность фибробетона на изгиб по упрощенной формуле:

$$\sigma_c = A\sigma_m(1 - V_f) + 0,82\tau_{cu} l/d. \quad (1.16)$$

где τ_{cu} – расчетное касательное напряжение сцепления, Па.

В формуле (1.16) коэффициент A в скрытой форме содержит в себе предельное напряжение сцепления поверхности фибры с бетоном. Оно существенно колеблется в зависимости от обработки поверхности и формы фибр. Поэтому у разных авторов коэффициент A принимает разные значения. Например, в работе [108] $A = 0,47$, а в [112] $A = 0,97$.

Зависимость «изгибающая нагрузка – прогиб» характеризуется плавным

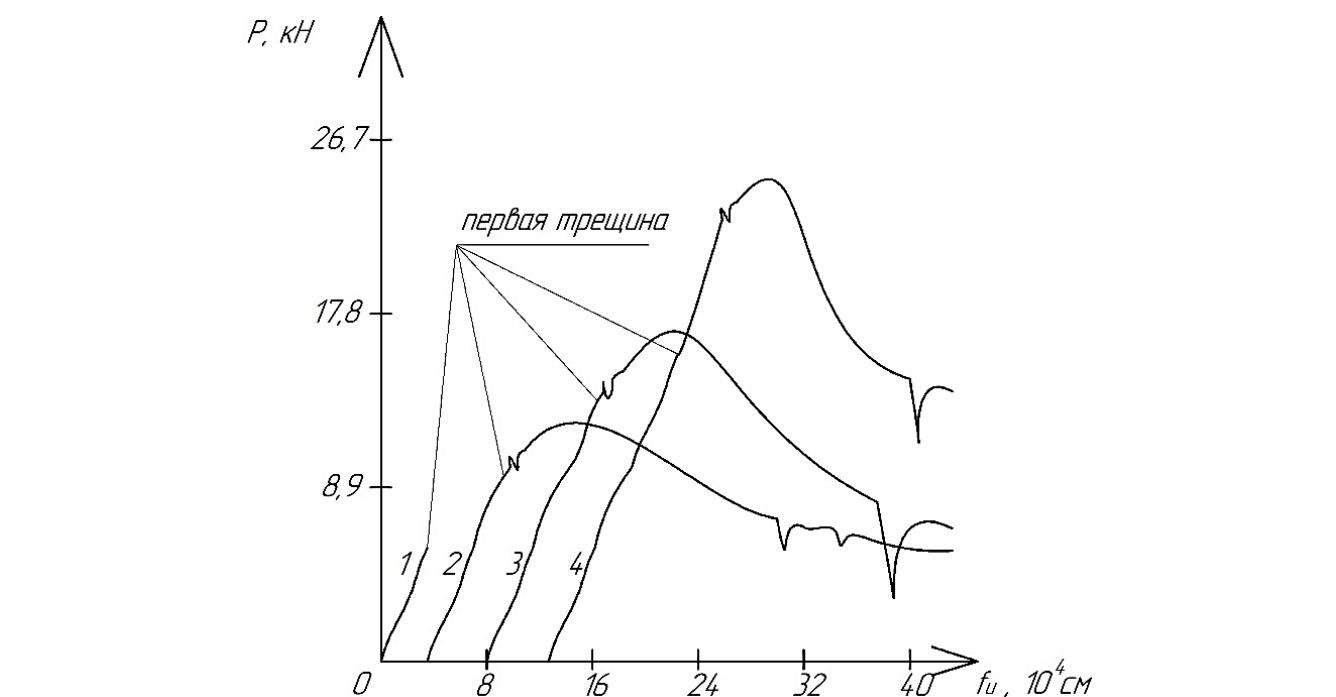


Рисунок 1.4 – Зависимость величины стрелки f_u прогиба от нагрузки Р у
сталефибробетонных балок размером 100x100x5000 мм при различном
содержании фибр: 1 – $\mu = 0$; 2 – $\mu = 0,01$; 3 – $\mu = 0,02$; 4 – $\mu = 0,03$

До появления трещин, наблюдается пропорциональная зависимость прогиба от нагрузки. После появления трещин прогиб увеличивается, а пропорциональность между нагрузкой и прогибом нарушается. При этом, как следует из рисунка 1.4, нагрузка, соответствующая появлению трещин, возрастает с увеличением содержания фибр в бетоне.

С раскрытием трещин у части фибр происходит нарушение сцепления с бетоном. В дальнейшем воспринимаемая этими фибрами нагрузка определяется

коэффициентом трения между их поверхностью и бетоном. После достижения предельного значения нагрузка, в связи с наличием трения между фибрами и бетоном, постепенно снижается при интенсивном развитии деформации, как показано на рисунке 1.4.

До появления первой трещины в сталефибробетоне, его упругие деформационные свойства характеризуются модулем упругости $E_{фб}$ [63]. Принимая во внимание произвольную ориентацию фибр, можно считать, что величина $E_{фб}$ находится между значениями, вычисленными по формулам «правила смесей» по формулам (1.17) и (1.18), которые отражают упругие свойства композиционного материала, армированного непрерывными волокнами при параллельном и перпендикулярном их расположении относительно направления действия нагрузки:

$$E_{фб} = E_{ф}\mu + E_{б}(1 - \mu), \quad (1.17)$$

$$E_{фб} = \frac{E_{ф}E_{б}}{\mu E_{б} + (1 - \mu)E_{ф}}. \quad (1.18)$$

Как показали исследования фибробетона [73, 84, 90], для более точного определения $E_{фб}$ можно воспользоваться формулой (1.17) с введением в нее дополнительных коэффициентов β_l и β_θ , которые учитывают сцепление фибр с бетоном, их эффективную длину и ориентацию:

$$E_{фб} = E_{ф}\mu\beta_l\beta_\theta + E_{б}(1 - \mu). \quad (1.19)$$

Для оценки полной деформативности сталефибробетона необходимо знать его поведение после образования трещин. Фибры, пересекающие трещины ведут себя по-разному, в зависимости от μ , l/d , сцепления их поверхности с бетоном, прочностных и деформационных характеристик бетона и материала фибр. Это поведение, в свою очередь, определяет раскрытие трещин, а, следовательно, и деформативность фибробетона. Однако, эти вопросы мало освещены в литературе.

1.6 Перспективы использования высокопрочного шлакопемзобетона в качестве исходной матрицы для дальнейшего дисперсного армирования

Липецкая область — это уникальный район, обладающий большими запасами шлаковых материалов и других благодаря работе на ее территории ПАО «НЛМК». Поэтому изучение свойств СФБ на основе отходов ПАО «НЛМК» путем введения в бетон-матрицу шлаковых заполнителей из отсевов дробления, с различным процентом армирования матрицы бетона и вторичных отходов доменного производства является одной из актуальных проблем, решаемых данным способом. Кроме того для мелкозернистого СФШБ отсутствует научное обоснование методики по определению расчетных характеристик на растяжение СФШБ в интервале классов бетон-матрицы В10 до В20 и от В20 до В40.

Преимущества мелкозернистого шлакопемзобетона класса В30 и В40 следующие:

- сокращение максимального размера зерен заполнителя до 5-10 мм;
- повышенное сцепление цементного камня с заполнителем;
- одинаковая физико-механическая природа цементного камня и заполнителя.

Одной из особенностей этого бетона является наличие в его составе тонкомолотой добавки, взятой в соотношении 1:1 с цементом.

В соответствии с современными представлениями бетон можно приготовить как неоднородное гетерогенное тело, в котором сочетается структура пористого камня с втопленными в него заполнителями разных размеров и микропор, расположенных в цементном камне и заполнителем, а также в зонах контакта между ними. Свойства затвердевшего бетона зависят от свойств исходных компонентов, характера физико-химического и физического взаимодействия между ними. Все это определяет неоднородности бетона – весьма существенного фактора предопределяющего, в свою очередь, его прочность, деформативность и стойкость.

В бетоне, как техническом материале конгломератного строения, различают твердую фазу – зерно заполнителя, частицы микрозаполнителя и непрогидратированного вяжущего, объединение вместе с цементным камнем, капиллярно-поровую структуру, образуемую заполненным воздухом и свободной водой затворения, а также зону контакта цементного камня с заполнителем.

Кроме того, наличие в составе изучаемого бетона тонкомолотой шлакопемзовой добавки, повышает насыщенность шлаком как цементного камня, так и бетона в целом. Так получается более однородная структура цементного камня, насыщенного добавкой. Высокая насыщенность шлакопемзобетона шлаковой пемзой, играет роль активного макрозаполнителя и заполнителя, что несомненно является важнейшим фактором, способствующим повышению микроструктуры и макрооднородности изучаемого материала.

1.7 Использование песка из отсеков дробления литого шлакового щебня

Возможность использования отсеков дробления литого шлакового щебня ПАО «НЛМК» в качестве мелкого заполнителя для мелкозернистых бетонов рассматривалась ранее, например, в диссертациях Галкина В.В., Черноусова Р.Н. и др.

Область оптимальных зерновых составов природных кварцевых песков хорошо изучена и определена стандартом.

Однако для песков, получаемых из других материалов, например, из различных отходов промышленности, область оптимальных зерновых составов может существенно отличаться от стандартной вследствие особенностей физико-механических свойств песка, обусловленных его вещественным составом и способом производства.

Анализ реального зернового состава песка из отсеков дробления литого шлакового щебня ПАО «НЛМК» показал, что модуль крупности может колебаться в значительных пределах ($M_{кр} = 1,5...3,0$), поэтому, кроме круга вопросов, связанных с определением возможности применения данных отходов (попутных

продуктов) промышленности в качестве сырья для производства мелкого заполнителя, необходимо проведение тщательных исследований по выбору оптимального зернового состава дробленого песка.

1.8 Выводы по главе 1

На основе анализа данных, приведенных в технической литературе, а также полученных при проведении собственных предварительных экспериментов, сформулированы следующие основные выводы:

1. Количество фибр, пересекаемых расчетной плоскостью или общее количество фибр в ограниченном объеме не зависит от длины фибр.
2. Влияние разнонаправленности армирования на прочность СФБ при растяжении связано с несовпадением направления фибр и направления внешнего растягивающего усилия.
3. Распределение и ориентация фибр в конструкции – это важнейшие характеристики, оказывающие влияние на определение прочности и др. свойства СФБК.
4. Обоснована эффективность использования различной металлической фибры совместно с отходами местных производств в составе армирования фибробетона.
5. Для предотвращения полного расслоения отдельных элементов в СФБК, выведены зависимости, позволяющие регулировать распределение фибр по высоте сечения.
6. Существующие формулы для расчета СФБ элементов включают множество эмпирических коэффициентов, что ограничивает область их применения.
7. Применение шлаковой пемзы повышает микроструктуру неоднородности сталефибробетона.
8. Необходимо разработать методику определения оптимального зернового состава песка из отсева дробления литого шлакового щебня.

2 ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ СФШБ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МЕСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

2.1 Лабораторное испытательное и регистрирующее оборудование

Программа, задачи экспериментальных исследований, испытательное и регистрирующее оборудование приведены в таблице 2.1.

Для проведения испытаний применяли:

- формы стальные размерами 40х40х160 мм, 100х100х100мм, 100х100х400мм по ГОСТ 22685—89;
- лабораторную виброплощадку типа 435А;
- стандартный набор сит;
- сушильный шкаф ШС-80-01- предназначен для сушки материалов;
- пресс гидравлический П-50- предназначен для испытания стандартных образцов бетона на сжатие и изгиб;
- пресс гидравлический ПГМ-500МГ4А - предназначен для создания и измерения нагрузки при статических испытаниях на сжатие и изгиб контрольных образцов из бетона, а также других строительных материалов;
- весы электронные NAGEMA - предназначены для взвешивания материала;
- машина испытательная на изгиб МИИ-100 – предназначена для определения предела прочности при изгибе цементных образцов;
- устройство для испытания бетона на водонепроницаемость УВБ-МГ4.01- предназначено для испытания бетона на водонепроницаемость по ГОСТ12730.5;
- прибор ОВС – предназначен для определения водоудерживающей способности растворной смеси.

Таблица 2.1 – Программа, задачи экспериментальных исследований, испытательное и регистрирующее оборудование

Вид испытаний, образцы	Задачи испытаний	Испытательное и регистрирующее оборудование
Определение размеров, массы, плотности материалов образцов. Испытание образцов на сжатие. Кубы 100х100х100мм, призмы 100х100х400 мм	Оценка прочности сталефибробетона от структурообразующих и технологических факторов. Исследование степени трещиностойкости материала.	Пресс П-125, измерительная линейка, весы лабораторные ВЛР200, пресс ИПС 100, индикаторы часового типа с ценой деления 10мм.
Испытания изгибаемых элементов. Балки - 1500х90х120	Испытание изгибаемых элементов из сталефибробетона армированных стальной фиброй Драмикс кратковременной и малоцикловой нагрузки.	Пресс ИПС-100, устройство для испытаний балок в виде траверс с шаровыми и катковыми опорами, индикаторы часового типа с ценой деления 10^{-3} и 10^{-2} мм
Определение длительной прочности. Призмы 100х100х400, с центральным отверстием (диаметр 20...40 мм)	Определение длительной прочности ШБ образцов, армированных стальной фиброй «Драмикс»	Устройство для испытания на длительную прочность

Лабораторная виброплощадка в загруженном состоянии обеспечивала вертикальные колебания частотой 2900 ± 100 в минуту и амплитудой $(0,5 \pm 0,05)$ м. Виброплощадка имела устройство, обеспечивающее при вибрировании жесткое крепление формы с раствором к поверхности стола

Общие виды образцов из СФШБ и основного испытательного и регистрирующего оборудования приведены на рисунках 2.1 и 2.2.

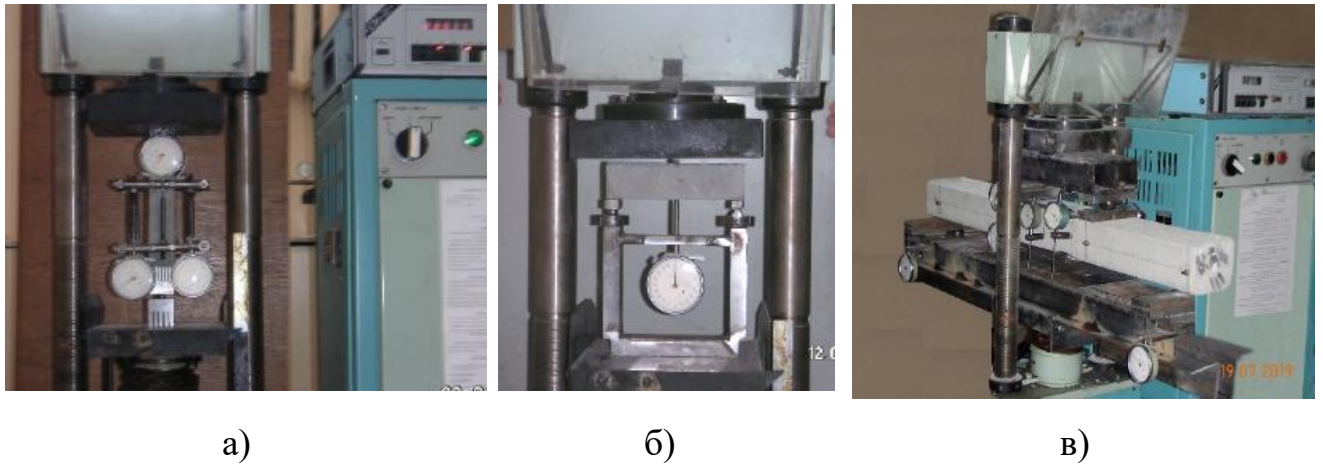


Рисунок 2.1 – Общие виды образцов из СФШБ и основного испытательного и регистрирующего оборудования при определении: а) —призменной прочности, б) —прочности при изгибе, в) испытании натуральных изгибаемых элементов (балок, размером 90х80х1500мм)

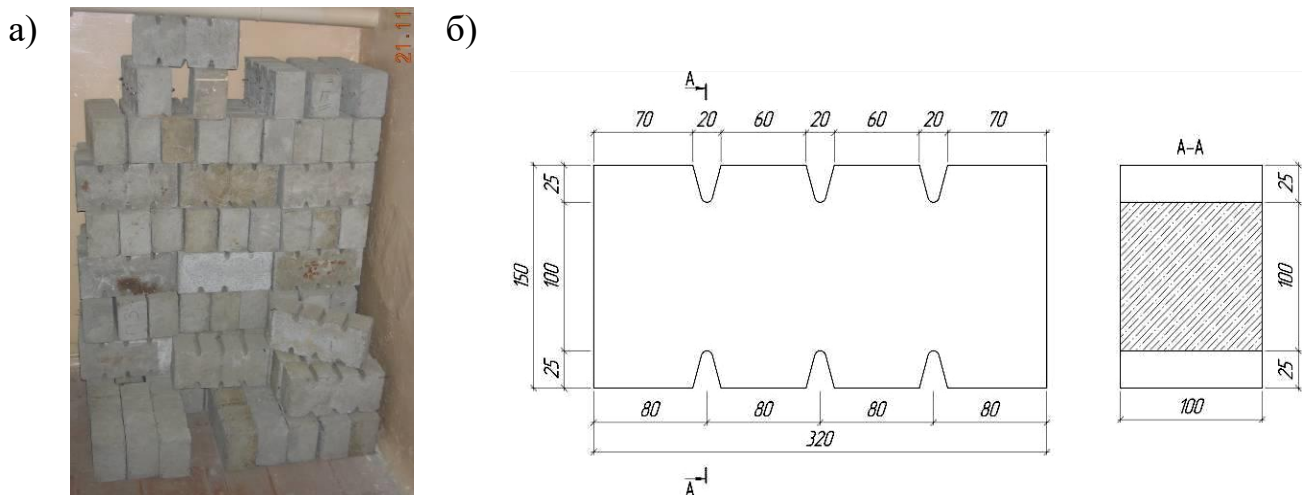


Рисунок 2.2 – Образец для испытания: а) – партия образцов для косвенных испытаний на растяжение; б) – размеры образцов

При испытании прочности анкеровки фиброволокна, расположенного в шлакобетонном образце, использовалась установка, схема которой (фрагмент) показана на рисунках 2.3 и 2.4.

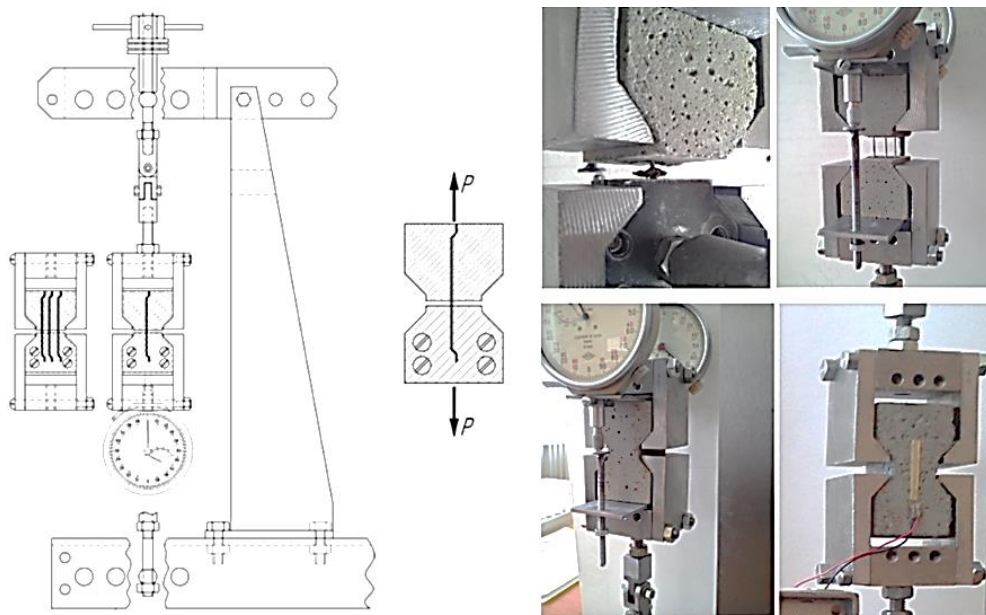


Рисунок 2.3 – Крепление образца при испытании фибры на выдёргивание из шлакобетона



Рисунок 2.4 – Использование зажимов для испытания фибры

Испытательное оборудование и процесс испытаний СФШБ на осевое растяжение и изгиб приведены на рисунках 2.5 и 2.6.

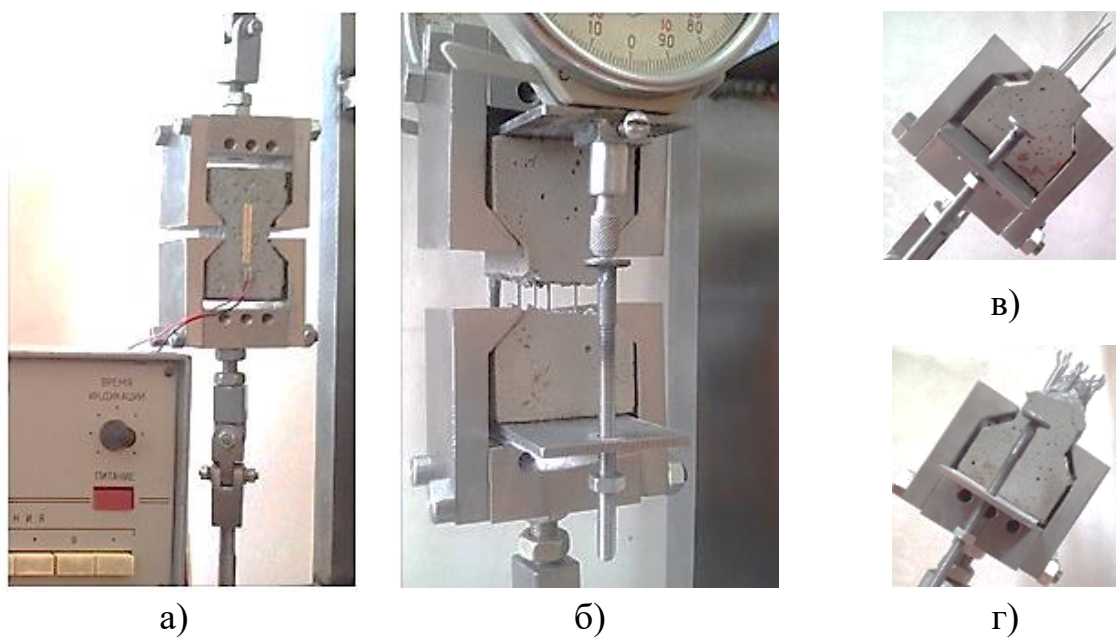


Рисунок 2.5 – Испытания образцов на осевое растяжение: а – образец в зажимах экспериментальной установки, б – испытание прочности анкеровки фибры в шлакобетонном элементе, в и г – результат выдергивания фибры из шлакобетонной матрицы

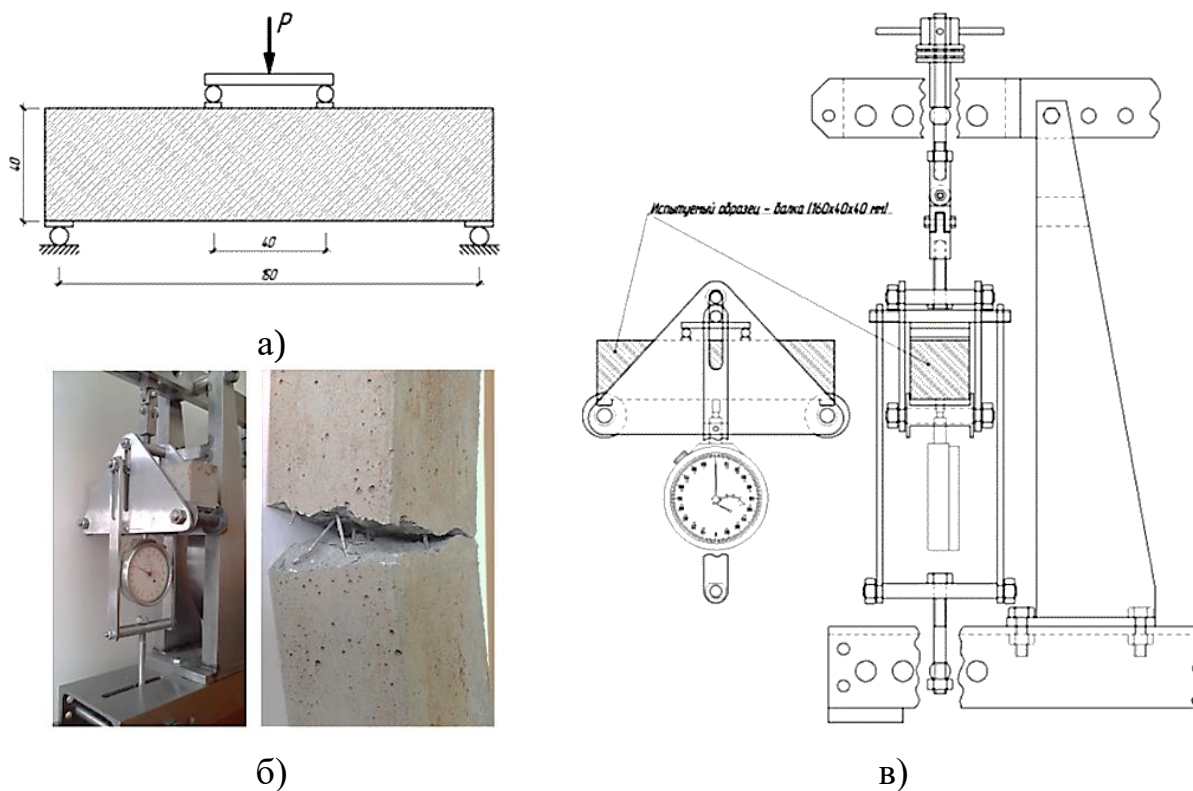


Рисунок 2.6 – Крепление балки 160x40x40 мм при испытании на изгиб: а – схема закрепления балки в захватах, б – фотоиллюстрация крепления балки, в – схема нагружения балки

2.2 Материалы

2.2.1 Свойства исходных пористых заполнителей

Шлаковая пемза, полученная гидроэкранным способом, имеет развитую и открытую пористость.

Получают этот пористый заполнитель из доменных шлаков предельных и литейных чугунов. Колебания в химическом составе шлаковой пемзы представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав шлаковой пемзы

Содержание основных оксидов, % массы						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	M ₃ O	Fe ₂ O ₃	MnO	S _{общ}
40,08	37,77	11,97	9,81	0,20	0,24	0,69

Основные физико-механические и теплофизические свойства шлаковой пемзы определяются главным образом характером ее пористо-капиллярной структуры, минералогическим, фазовым составом (особенности микроструктуры показаны на рисунках 2.7 и 2.8).



Рисунок 2.7 – Макроструктура
шлаковой пемзы



Рисунок 2.8 – Микроструктура
шлаковой пемзы. Видны кристаллы
мелилита

Минералогический состав шлаковой пемзы определяется свойствами расплава, связанными с его химическим составом, температурой шлака в момент обработки, а также способом поризации.

Доменные шлаковые расплавы по своей способности кристаллизоваться делятся на две группы. Первая группа шлаковой пемзой (рисунок 2.7) характеризуется преобладанием следующим содержанием минералов: мелилит, ронкинит, псевдоволластонит. Вторая группа – преобладанием милимита, двухкальцевым силиката, ринкината. По содержанию стеклофазы Липецкую шлаковую пемзу можно разделить на три группы: первая – содержание стеклофазы менее 30%; вторая от 30 до 45%; третья – более 45%.

Физико-механические свойства шлаковой пемзы, используемой для приготовления высокопрочных шлакопемзобетонов, были определены в соответствии с ГОСТ 9760-75 «Щебень и песок из пористого металлургического шлака» и ГОСТ 5578-2019 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов» и ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические. Методы испытаний».

В качестве бетон-матрицы для СФШБ применялся мелкозернистый бетон на мелком пористом заполнителе (отсев от дробления литого шлакового щебня производства ПАО «НЛМК») взамен кварцевого песка.

Зерновой состав проб песка и отсева из шлакового щебня приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Зерновой состав проб песка и отсева из шлакового щебня

Материал	Остатки	Размеры сит, мм						
		5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0
Песок	Частные	0,7	1,7	14,6	18,8	36,2	28	0
	Полные	0,7	2,4	17,0	35,8	72,0	100	0
Отсев от дробления шлака	Частные	3,7	36,7	14,0	21,9	14,5	6,6	2,8
	Полные	3,7	40,2	54,2	76,1	90,6	97,2	100

На рисунке 2.9 приведен фрагмент вышеуказанных материалов.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Фрагмент материалов, используемых в качестве заполнителей для СФШБ: а) 5 – 20 мм, мелкофракционный; б) 0 – 5 мм, отсев от дробления.

Основные физико-механические свойства шлакопемзового песка и шлакопемзовой добавки представлены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Основные физико-механические свойства шлакопемзового песка

Наименование свойств	Единица измерения	Показатели свойств
Плотность	г/см ³	2,90
Пустотность	%	58
Водопоглощаемость	%	42,3
Удельная поверхность	м ² /т	197,8
Средняя плотность	кг/м ³	980 - 1180

Таблица 2.5 – Основные свойства шлакопемзовой добавки

Наименование свойств	Единица измерения	Показатели свойств
Модуль основности	-	0,89 – 1,08
Модуль активности	-	0,26 – 0,38
Глиноземистый модуль	-	16,8 – 18,4
Коэффициент качества	-	1,54
Коэффициент насыщения	-	1,99
Удельная поверхность	см ² /г	2500 - 3300

2.2.2 Основные свойства цемента

В качестве вяжущего для получения высокопрочного шлакопемзобетона использовали портландцемент марки 500. Испытание цемента производились по ГОСТ 10178 – 85. Тонкость помола используемого цемента находилась в интервале 2500 – 3300 см²/г.

Пределы прочности цемента при изгибе и сжатии должны быть не менее величин, указанных в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные свойства цемента

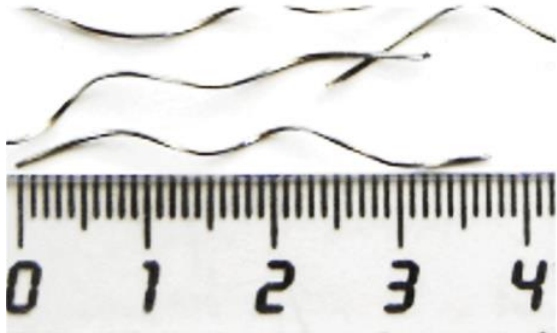
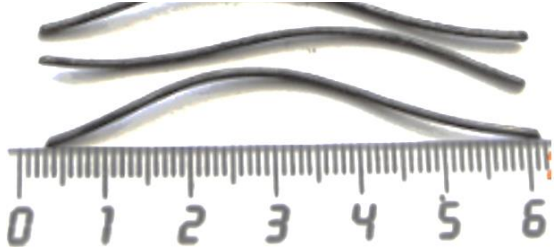
Завод-изготовитель (цементные заводы)	Марка цемента	Характеристика цемента			
		Нормальная густота, %	Группа эффективности пропаривания	Активность цемента, МПа	
				на сжатие	на изгиб
Липецкий	ШПЦ М300, М400	- 27	- Первая	- 38..42	- 4,5..5,6
Старооскольский	ПЦМ400, М500	- 26	- Вторая	- 41,7-52,2	- 4.3...5,2

Определение физико-механических свойств цемента производилось по ГОСТ 310.1-76, ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 310.4-81.

2.2.3 Стальная фибра

Технические показатели стальной фибры, используемых в исследованиях, приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 — Технические показатели стальной фибры

Наименование используемых фибр	Геометрические размеры, мм		Временное сопротивление разрыву, R_f , МПа
	Длина (l)	Диаметр (d)	
- из стальной проволоки (прямая)	97	0,8	690
- из стальной проволоки (волнистая) 	70	0,63	680
-фрезерованная из листа 	44	0,49	529
Из проволоки канатов и тросов (вторсырье) 	80	1,0	1200
Фибра Dramix 	60	0,75	1100

2.3 Методики экспериментальных исследований

2.3.1 Методика подбора состава мелкозернистого шлакопемзобетона

Подбор состава мелкозернистого шлакопемзобетона осуществляли по общепринятым методикам. Бетонную смесь приготавливали по следующей технологии. Вначале смешивали тонкомолотую шлакопемзовую добавку с цементом в объемных соотношениях 1:1. После этого смесь тщательно перемешивали с песком-заполнителем, а затем подливали воду в расчетных количествах. Для перемешивания бетонной смеси использовали бетонную емкость 50 л. Смесь уплотняли на стандартной виброплощадке в течении 1 – 1,5 минут с частотой колебаний 2800 – 3000 об/мин.

Применяемые для исследований составы высокопрочного мелкозернистого шлакопемзобетона В30 и В40 приведены в таблицах 2.8 и 2.9.

Таблица 2.8 – Состав высокопрочного шлакопемзобетона В 30

Класс бетона	Расход сухих материалов на 1 м ³				Жесткость, с	Объемная масса, кг/м ³
	Цемент марки 500, кг	Шлакопем-зовая добавка, кг	Шлакопемзо-вый песок, м ³	Вода, л		
В30	410	390	1,05	228	До 30	2000

Таблица 2.9 – Состав высокопрочного шлакопемзобетона В 40

Класс бетона	Расход сухих материалов на 1 м ³				Жесткость, с	Средняя плотность, кг/м ³
	Цемент марки 500, кг	Шлакопем-зовая добавка, кг	Шлакопемзо-вый песок, м ³	Вода, л		
В40	465	420	1,03	240	До 30	2100

2.3.2 Методика определения модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона

Определение модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона класса В30 и В40 осуществлялось на призмах размером 100х100х400 мм.

Перед испытанием образца проверяли совпадение его геометрической и физической оси. Это проверялось показателями тензометров ТА-2 на базе 100 мм, что показано на рисунке 2.10, установленных на боковых гранях призмы, при нагрузках равных примерно 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 от ожидаемой разрушающей нагрузки. Если отклонение показаний тензометров не превышает 5%, то это означает, что физическая ось совпадает с геометрической.

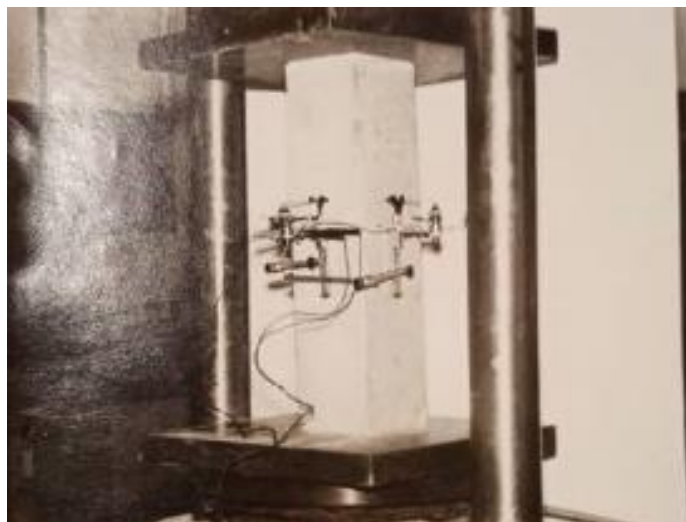


Рисунок 2.10 – Определение начального модуля упругости шлакопемзобетона на образцах-призмах

При определении начального модуля упругости нагружение образцов производили ступенями, примерно по 0,1 от ожидаемой разрушающей нагрузки, со снятием до $0,05R_b$ после каждой ступени.

Нагрузку равную $0,05R_b$ обозначали как «начальную». После приложения каждой ступени нагрузка выдерживалась 3 минуты для стабилизации деформаций.

2.3.3 Методика определение расслаиваемости и водоотделения растворной смеси на основе отсева дробления ЛШЩ

Расслаиваемость растворной смеси, характеризующая ее связность при динамическом воздействии, определяют путем сопоставления содержания массы заполнителя в нижней и верхней частях свежесформованного образца размерами 150х150х150 мм.

Проведение испытаний.

Растворную смесь укладывали и уплотняли в форме для контрольных образцов размерами 150х150х150 мм. После этого уплотненную растворную смесь в форме подвергали вибрационному воздействию на лабораторной виброплощадке в течение 1 мин. Для разных составов время вибрационного воздействия на лабораторной виброплощадке различно: жесткую смесь марок Ж1-Ж4 – в течение 120 с; подвижную смесь марок П1 и П2 - 25 с, марок П3-П5 – 10 с.

После вибрирования верхний слой раствора высотой (75 ± 5) мм из формы отбирали на предварительно взвешенный противень, а нижнюю часть образца выгружали из формы путем опрокидывания на второй противень и взвешивали с погрешностью до 2 г. После подвергали мокрому севу на сите с отверстиями 0,14 мм.

При мокром севе отдельные части пробы, уложенные на сито, промывали струей чистой воды до полного удаления вяжущего. Промывку смеси считали законченной, когда из сита вытекала чистая вода. Отмытые порции заполнителя переносили на чистый противень, высушивали до постоянной массы при температуре 105—110°C и взвешивали с погрешностью до 2 г.

Коэффициент расслаиваемости уплотненной растворной смеси (K_p) определялся по формуле:

$$K_p = \frac{m_b}{m_n}, \quad (2.1)$$

где m_b – масса отмытого и высушенного заполнителя из верхней части образца, г;

m_H – масса отмытого и высушенного заполнителя из нижней части образца, г.

2.3.4 Методика определения оптимального зернового состава мелкого заполнителя

Разработана методика определения оптимального зернового состава мелкого заполнителя, использованная при выборе рациональной гранулометрии песка из отсеков дробления литого шлакового щебня металлургического производства.

При разработке методики руководствовались следующим. Выбор оптимальной гранулометрии мелкого заполнителя может, в принципе, быть проведен при сравнении бетонов на песках нескольких зерновых составов. Однако такая работа трудоемка, и длительна. Как известно, основная структурообразующая роль песка в бетонной смеси песка заключается в повышении вязкости цементного теста, что обеспечивает удержание зерен крупного заполнителя в растворе во взвешенном состоянии (без расслоения). Песок также оказывает влияние на седиментационные процессы, проходящие в растворной части бетона, характеризующиеся, в частности, водоотделением.

Таким образом, основные функции мелкого заполнителя реализуются в растворной составляющей бетонной смеси, поэтому выбор оптимального зернового состава песка можно осуществить по испытанию его в растворе.

Наиболее распространенный в настоящее время способ оценки качества мелкого заполнителя по его водопотребности, включающий определение диаметра расплыва растворного конуса на встряхивающем столике, односторонне характеризует свойства растворной смеси на данном песке по реологическому показателю, коррелируемому с предельным напряжением сдвига. При этом седиментационные характеристики растворной смеси во внимание не принимаются, что приводит к случаям, когда на песке, удовлетворительном по показателям водопотребности, невозможно приготовить связную, нерасслаивающуюся бетонную смесь.

Поэтому для объективной оценки свойств мелкого заполнителя, испытываемого в растворной смеси, необходимо параллельное определение ее реологических и седиментационных характеристик.

Учитывая, что реологические свойства вибрируемой бетонной смеси достаточно полно характеризуются структурной вязкостью, именно этот показатель целесообразно взять в качестве критерия при испытании песка в растворной смеси; данную операцию удобно совместить и с определением расслаиваемости и структурной вязкости смеси на шариковом вибровискозиметре.

Выбор оптимального зернового состава дробленого песка для мелкозернистого бетона включает следующие операции.

Определяется диапазон зерновых составов песка в пределах возможностей принятого вида дробильного оборудования. В границах выбранного диапазона назначаются зерновые составы песков с интервалом модуля крупности, равным 0,2.

На каждом из испытываемых песков готовятся растворные смеси состава 1:2 и 1:3 (область составов растворной составляющей принята наиболее употребимых классов бетона) с расходом воды, обеспечивающим получение смесей с вязкостью в диапазоне 2-10 Па·с (диаметр расплыва конуса 11-22 см), у которых определяется структурная вязкость, расслаиваемость и, в случае необходимости, водоотделение.

По найденным характеристикам растворной части определяются оптимальные зерновые составы песка.

Для растворов состава 1:2 и 1:3 кривые оптимальной гранулометрии песка, как правило, не совпадают, и за оптимальную принимается область зерновых составов, заключенная между ними.

В виду особой роли фракции песка менее 0,14 мм и возможного колебания ее содержания в процессе производства и транспортировки, изучается влияние данной фракции на свойства растворной смеси. При этом сравниваются характеристики смеси на песке из области оптимальной гранулометрии с различным количеством фракции менее 0,14 мм и определяется в каких пределах содержание данной фракции существенно не ухудшает контролируемых характеристик.

2.3.5 Методика проектирования оптимального состава мелкозернистого сталефибробетона на основе отходов местных производств

Для применения сталефибробетона (СФБ) на основе отходов местных производств в транспортных сооружениях необходимо разработать способ оптимизации его состава.

На сегодня нет теоретических положений о расчете и подборе состава сталефибробетона в зависимости от факторов: количества, геометрических размеров и форм стальных фибр.

Большинство способов оптимизации базируется на методе абсолютных объемов, который положен в основу излагаемой методики.

Решение задачи нахождения оптимального состава бетона облегчается при учете следующих основных закономерностей, характерных для мелкозернистого шлакопемзобетона.

1. Консистенция (удобоукладываемость) смеси при выбранных материалах для бетона определяется в основном содержанием воды в ней и почти не зависит от расхода цемента. Следовательно, чем меньше воды в бетонной смеси, тем она жестче. Таким образом, в общем случае можно считать так:

$$B = f(J), \quad (2.2)$$

где J – жесткость смеси по ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

По жесткости, подвижности и применяемому формовочному оборудованию сталефибробетонные смеси условно могут быть разделены на пять групп:

I группа – $J \leq 4$ с.;

II группа – $5 \text{ с.} \leq J \leq 10 \text{ с.}$;

III группа – $11 \text{ с.} \leq J \leq 20 \text{ с.}$;

VI группа – $21 \text{ с.} \leq J \leq 30 \text{ с.}$;

V группа – J более 30 с.

2. Прочность плотного бетона зависит в основном от соотношения между водой и цементом, т.е.

$$R_b = f(B/C), \quad (2.3)$$

где R_b — прочность бетона, Па.

Порядок работы по назначению состава сталефиброшлакобетона:

1) Назначение диаметра и длины фибры.

При этом учитывают, что для экономии вяжущего целесообразно иметь возможно большие размеры применяемых фибр. Однако, необходимо помнить, что их размеры, также ограничиваются сечениями изделия, которое, в свою очередь, влияет и на ориентацию фибр в конструкции. В связи с этим, размеры контрольных образцов должны соответствовать поперечному сечению конструкций, для которых и будет применяться соответствующий состав.

Если размеры контрольных образцов не соответствуют поперечному сечению конструкций, то необходимо проведение дополнительных опытов, для корректировки состава.

2) Назначение консистенции смеси.

Введение в состав бетонной матрицы фибр приводит к значительному повышению жесткости, поэтому максимальную жесткость матрицы целесообразно брать $J \leq 10$ с.

Если жесткость находится в других параметрах, то необходимо проведение дополнительных экспериментов для корректировки состава.

3) Определение водопотребности бетонной смеси (матрицы).

Ее находят исходя из формул (2.2) и (2.3), при этом следует учитывать, что полученные результаты должны соответствовать экспериментам с использованием разных видов фибр.

4) Определение водоцементного отношения.

5) Подсчет расхода цемента.

6) Определяем максимальные значения объемного соотношения между заполнителями (фиброй и шлакопемзовым песком) и плотности смеси сухих заполнителей. Учитывая влияние данных величин на экономичность бетона и в

связи с этим важность точного их значения для конкретно применяемых заполнителей, целесообразно находить их экспериментально, используя следующую методику: смешивается 6 кг шлакопемзового песка и 0,3 кг фибры ($r = 0,175$), затем после перемешивания материал засыпается в цилиндр и уплотняется с разравнивающим диском на площадке (рисунок 2.11). Если толщина слоя смеси заполнителей h , то:

$$d = \frac{(\Phi + \Pi)(1 + r)}{Fh(\rho_{\Pi} + r\rho_{\Phi})}, \quad (2.4)$$

где ρ_{Π} – плотность песка, кг/м³;

ρ_{Φ} – плотность фибры, кг/м³;

r – отношение объемов фибры и песка.

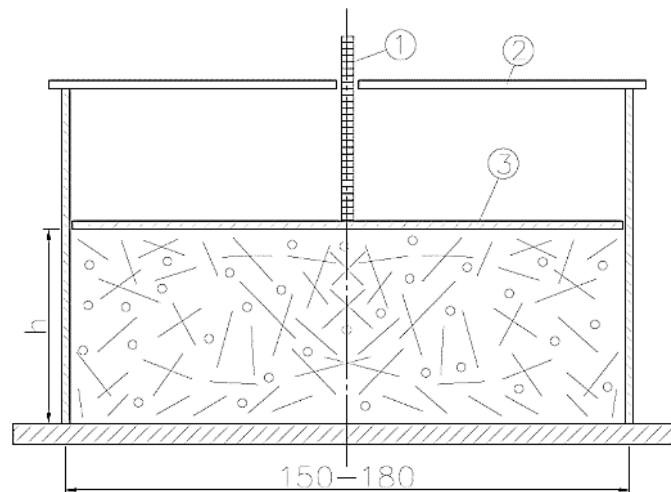


Рисунок 2.11 – Объёмомер для определения средней плотности сыпучих материалов (фибры и песка): 1 – линейка на штоке (фиксируется так, что при отсутствии материала ее нулевое деление находилось на уровне краев цилиндра); 2 – фиксатор уровня; 3 – разравнивающий диск (его масса 1000 ± 100 г); 4 – испытываемый материал

Затем в смесь досыпается фибра до величины $r = 0,2$ и после перемешивания и уплотнения вновь определяется d (берется несколько значений r пока не будет достигнута минимальная пустотность смеси). За r_m следует принимать величину r , при значениях выше которой d не увеличивается или возрастает незначительно (численно это можно представить так: если при двух значениях $r_1 = r' + 0,025$ и

$r_2 = r_1 + 0,025$ каждый раз будет получен прирост относительной плотности $\Delta d = 0,01$, то $r' = \tau_m$). Величина r_m обычно находится в интервале 0,1-0,2, а $d_m = 0,65 - 0,75$ – максимальная плотность смеси сухих заполнителей.

Используя эту методику, r_m и d_m можно определять за 30-40 минут.

2.3.6 Методика определения приведенных коэффициентов ориентации фибр

С учетом ранее полученной формулы (1.4) определения коэффициента ориентации фибр (K_g) в сечениях, наклонных под различными углами α к продольной оси элемента предлагается представлять распределение фибр равномерным по всему объёму, но для определения доли фибр, воспринимающих отдельно действие растягивающих и сжимающих усилий в элементе, ввести приведённые коэффициенты ориентации (K_t и K_s), учитывающие работу фибр в направлении относительно главных растягивающих напряжений (K_t) и работу фибр в сечении, перпендикулярном направлению внешнего сжимающего усилия (K_s):

$$K_t = \left[\left(0,64 + 0,29 \frac{l_f}{b} \right) \cdot \left(0,79 + 0,15 \frac{l_f}{h} \right) \right]^2, \quad (2.5)$$

$$K_s = \left[\left(0,64 - 0,374 \frac{l_f}{b} \right) \cdot \left(0,79 + 0,15 \frac{l_f}{h} \right) \right]^2, \quad (2.6)$$

где b – ширина сечения, мм;

h – высота сечения, мм;

l_f – длина фибр, мм.

Для используемых опытных образцов (сечением 40x40 мм и 100x100 мм) коэффициенты ориентации определялись по формулам:

$$K_t = \left[\left(0,506 + 0,325 \frac{l_f}{a} + 0,044 \left(\frac{l_f}{a} \right)^2 \right) \right]^2, \quad (2.7)$$

$$K_s = \left[\left(0,506 - 0,199 \frac{l_f}{a} - 0,056 \left(\frac{l_f}{a} \right)^2 \right) \right]^2. \quad (2.8)$$

Для куба с длиной ребра 100 мм (при сжатии) и размерами сечения 100x100 мм (при растяжении) формулы (2.7) и (2.8) приобретают удобный для обработки результатов стандартных испытаний (по ГОСТ) вид:

$$K_s = [(50600 - 200l_f - 0,56 l_f^2)10^{-5}]^2, \quad (2.9)$$

$$K_t = [(50600 + 325l_f + 0,44 l_f^2)10^{-5}]^2. \quad (2.10)$$

Приведенные коэффициенты ориентации влияют на коэффициенты приведённого армирования (μ_{fa} и μ'_{fa}), заменяющие коэффициенты объёмного армирования (μ_{fv}) для различных случаев: растяжение, показанном на рисунке 2.12 и сжатие, показанном на рисунке 2.13.

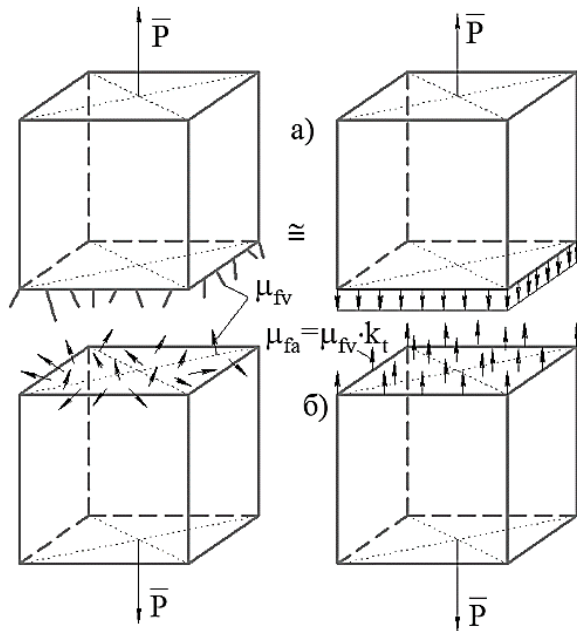


Рисунок 2.12 – Схема усилий и эпюра напряжений при центральном растяжении сталефибробетонных элементов: а) эпюра напряжений; б) учёт коэффициента приведённого армирования

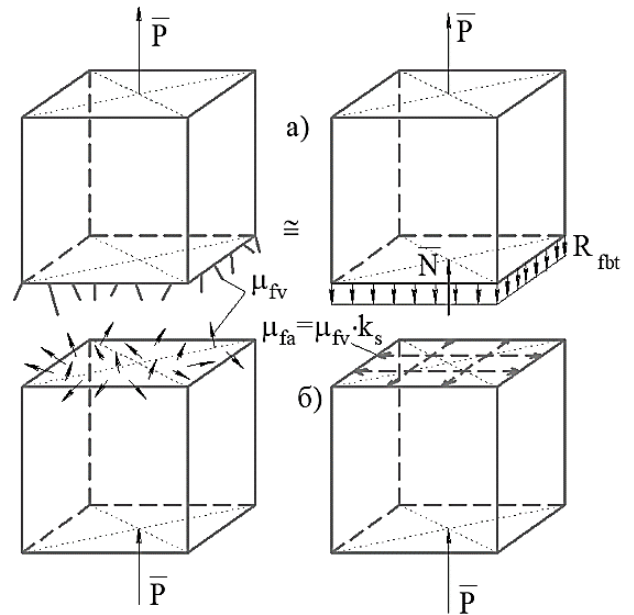


Рисунок 2.13 – Схема усилий и эпюра напряжений при центральном сжатии сталефибробетонных элементов: а) эпюра напряжений; б) учёт коэффициента приведённого армирования

2.3.7 Методика исследований неоднородности армирования

В литературе практически не встречается работ по методике исследований неоднородности армирования. Это еще раз подтверждает то, что большинство исследователей считает очевидным равномерность распределения фибр.

2.3.7.1 Методика определения степени расслаиваемости фибр

Степень расслаиваемости смеси характеризуется коэффициентом k_{st} . Для его определения образец в виде куба стандартных размером расплубливается до завершения процесса схватывания цемента и разделяется по высоте на 2 или 3 части (при этом могут использоваться специальные вилки). Производится отмывка отдельных частей куба и определяется количество (масса) фибр в каждой. Положение центра тяжести фибр в зависимости от способа разделения по высоте и метод определения приведенной высоты фибрового армирования приведены на рисунках 2.14 и 2.15.

Значение k_{st} определяется по формулам

- при разделении на две части:

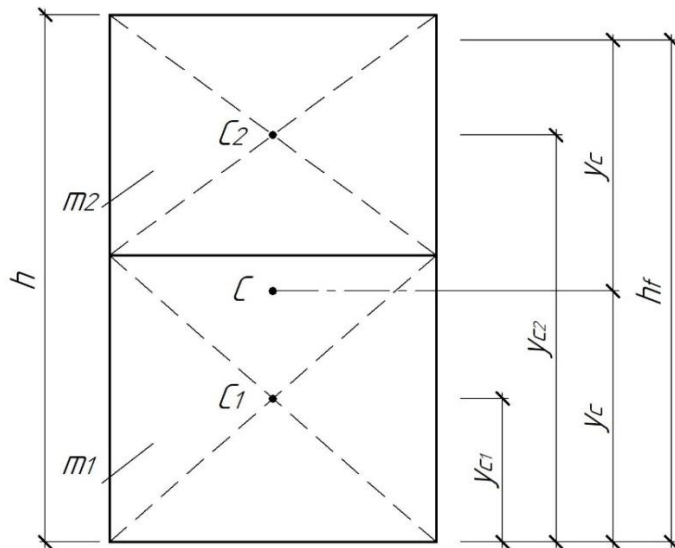
$$k_{st} = h/h_f = \frac{2(m_1+m_2)}{m_1+3m_2}, \quad (2.11)$$

где m_1, m_2 , – масса фибр в нижней и верхней половины образца.

- при разделении на три части:

$$k_{st} = h/h_f = \frac{3(m_1+m_2+m_3)}{m_1+3m_2+5m_3}, \quad (2.12)$$

где m_1, m_2, m_3 – масса фибр соответственно в нижней, средней и верхней трети образца, кг.



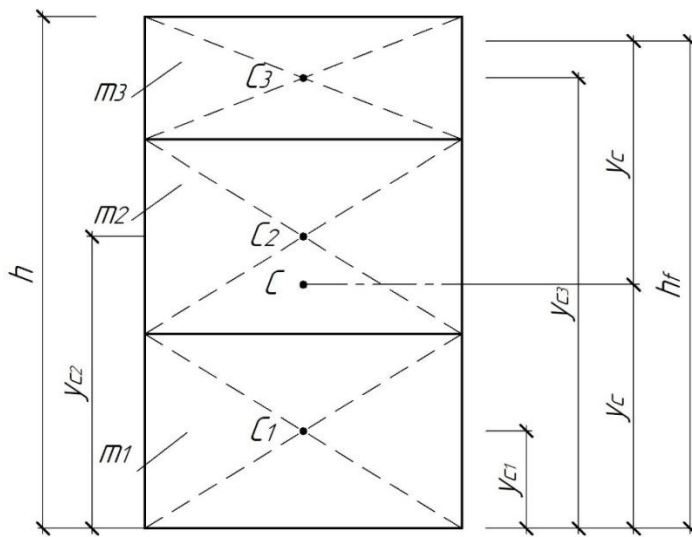
$$y_{c1} = \frac{h}{4}$$

$$y_{c2} = \frac{h}{2} + \frac{h}{4} = \frac{3h}{4}$$

$$Y_c = \frac{m_1 y_{c1} + m_2 y_{c2}}{m_1 + m_2}$$

$$h_f = 2Y_c = \frac{m_1 + 3m_2}{2(m_1 + m_2)} \cdot h$$

Рисунок 2.14 – Определение центра тяжести фибр в сечении и приведенной высоты фибрового армирования (при разделении на две части)



$$y_{c1} = \frac{h}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{h}{6}$$

$$y_{c2} = \frac{h}{3} + \frac{h}{6} = \frac{3h}{6} = \frac{h}{2}$$

$$y_{c23} = \frac{h}{3} \cdot 2 + \frac{h}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{5h}{6}$$

$$Y_c = \frac{m_1 y_{c1} + m_2 y_{c2} + m_3 y_{c3}}{m_1 + m_2 + m_3}$$

$$h_f = 2Y_c = \frac{m_1 + 3m_2 + 5m_3}{3(m_1 + m_2 + m_3)} \cdot h$$

Рисунок 2.15 – Определение центра тяжести фибр в сечении и приведенной высоты фибрового армирования (при разделении на три части)

2.3.7.2 Методика исследования сечений элементов по распилам

Для исследования характеристик распределения фибр по сечениям была изготовлена серия образцов-балочек размерами 100x100x400 мм с различными характеристиками армирования (вид фибровой арматуры, объемное содержание).

Виды фибровой арматуры приведены ранее в таблице 2.7.

Уплотнение СФШБ выполнялось на вибростоле при амплитуде колебаний 0,3 мм при частоте 3000 ± 200 кол.об/мин. до появления цементного молока. Время уплотнения образцов составляло от 1 до 10 мин. в зависимости от вида и процентного содержания фибровой арматуры.

Исследование сечений элементов производилось с целью изучения характера распределения армирующих фибр в сталефибробетонных элементах.

Образцы-балочки распиливались по высоте корундовым диском.

На полученные срезы наносилась координатная сетка с высотой ячейки 10 мм. Фибры, попавшие по толщине сечения в одну ячейку, суммировались, таким образом получался ряд цифр, отражающих распределение фибр по высоте сечения. Таким образом, учитывалась только вертикальная ориентация фибр, горизонтальная при этом оставалась хаотической.

Результаты цифровой обработки поверхности распила приведены в Главе 3.

При применении подвижных смесей, увеличения времени виброуплотнения может произойти опускание фибр в нижнюю часть. Степень опускания фибр удобно характеризовать через коэффициент k_{st}

$$k_{st} = h / 2Y_c, \quad (2.13)$$

где h – высота сечения, см;

Y_c – расстояние от нижней грани элемента до центра тяжести фибр в сечении, см.

2.3.8 Методика исследования анкеровки фибры в бетоне

Для проведения исследований была изготовлена специальная экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 2.16.

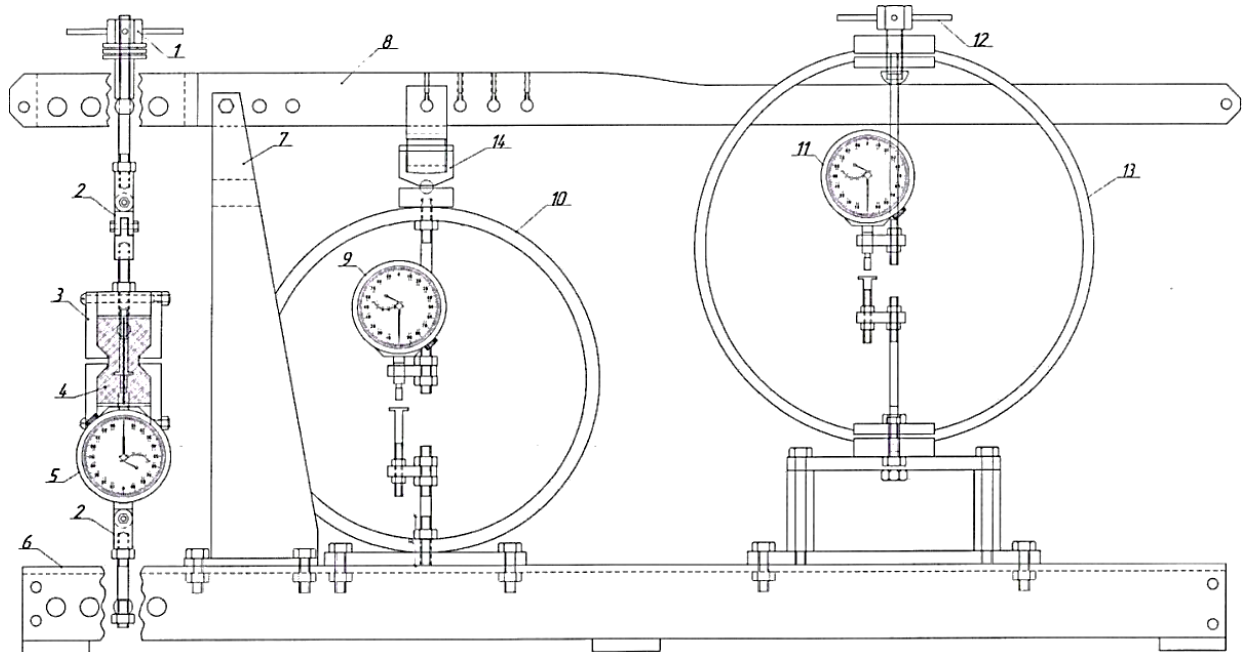


Рисунок 2.16 – Схема лабораторной установки для исследования работы фиброволокна в элементах шлакобетона

Перед испытанием фибру фиксируют в специальных зажимах, обеспечивающих статическое положение фибры во время испытания.

Зажимы с фиброй помещают в захваты установки, показанной на рисунке 2.16, после чего создают предварительное напряжение путём поворота винта 1. Приложение нагрузки на испытуемый образец 4 осуществляется посредством рычага 8.

Деформация фибры и нагрузка, действующая на динамометрические кольца, определялись с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, размещённых на специальных креплениях.

Перед началом испытаний устанавливают рычаг установки параллельно столу с помощью регулятора 14, находящегося над компенсатором 10.

Посредством винта 1, находящегося над захватами, создаём статическое положение захватов. Оси, передающие нагрузку на фибру, должны находиться на

одной линии, перпендикулярной основанию установки (данное условие обеспечивается посредством шарниров Гука 2). Записываются начальные показатели индикаторов 5, 9 и 11. Далее с помощью регулятора перераспределения нагрузки 14 снимаем нагрузку, действующую на компенсатор 10. При этом нагрузка, равная собственному весу той части рычага 8, которая расположена правее стойки 7, переходит на фибру, создавая преднапряжение. Определив положение стрелки индикатора, находящегося в компенсаторе, и зная цену деления этого индикатора, определяем начальную нагрузку, действующую на испытуемый образец (фибру), учитывая соотношение плеч приложения нагрузки. Записываем показания всех индикаторов. Далее нагрузка на образец создаётся посредством поворота винта 12, действующего на рычаг 8.

Далее снимаются показания индикаторов, определяющих нагрузку в кольце 13, а также тех индикаторов, которые измеряют деформацию образца (фибры). В момент, когда нагрузка на образец достигает 75-85% от критической (временное сопротивление растяжению) с помощью регулятора перераспределения нагрузки между компенсатором и рычагом создаём дополнительную упругую опору для рычага, которая будет забирать на себя часть нагрузки.

При дальнейшем увеличении нагрузки на образец показания снимаются уже со всех индикаторов. Нагрузка, действующая на фибру, рассчитывается исходя из величин нагрузок, создаваемых в динамометрических кольцах, и из величин плеч приложения этих нагрузок.

2.4 Методики расчета прочности СФШБ

2.4.1 Методика расчета прочности СФШБ при сжатии на основе теории трехосного сжатия

Важной особенностью фибрового армирования бетона является равномерность распределения фибр в объеме бетона. В силу этого, связи, препятствующие поперечному расширению бетона при сжатии, равномерно распределены по высоте элемента. Это обстоятельство делает возможным

разработку способа расчета прочности сталефибробетона при сжатии на основе существующей теории прочности бетона при сложном напряженном состоянии.

Бетон в элементах из сталефибробетона при сжатии будет испытывать трехосное неравномерное сжатие вида

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0, \quad (2.14)$$

где $\sigma_1 = R_b$ – призмочная прочность бетона, МПа;

σ_0 – величина бокового обжатия бетона, МПа.

Представим прочность бетона в виде

$$\sigma_1 = \varphi \cdot \sigma_0 + 0,5 \cdot (R_b - R_t) + c_1, \quad (2.15)$$

где R_t – прочность бетона при одноосном растяжении, МПа.

c_1 – коэффициент косвенного армирования, предложенный Лобановым А.И. в [47], его можно определить как

$$c_1 = \sqrt{(\varphi^2 + \varphi - 2) \cdot \sigma_0^2 + (2 + \varphi)(R_b - R_t) \cdot \sigma_0 + 0,25 \cdot (R_b + R_t)^2}, \quad (2.16)$$

где φ – параметр формы предельной поверхности, определяется по формуле

$$\varphi = \frac{2(3\omega - m)}{3\omega + m}, \quad (2.17)$$

где m – показатель класса материала (для бетона с ограниченными размерами крупных фракций, используемого для изготовления сталефибробетонных конструкций показатель прочности материала m равен 5);

ω – параметр хрупкости материала, равный отношению прочности материала при одноосном сжатии R_b к прочности при одноосном растяжении R_t : $\omega = R_b/R_t$.

При определении величины бокового обжатия бетона σ_0 будем полагать, что оно создается фибрами, сопротивляющимися поперечному расширению бетона. В предельном состоянии разрушение может сопровождаться либо частичным выдергиванием фибр из бетона и обрывом остальных, либо выдергиванием из бетона всех фибр. Это зависит от величины минимальной заделки фибр в бетоне ($l_{f,z}^{min} = l_{f,an}$), соответствующей их обрыву при выдергивании $l_{f,an}$

$$l_{f,an} = \frac{\eta_f d_f R_f}{R_b}, \quad (2.18)$$

где η_f – характеристика сцепления фибр с бетоном, определяемая опытным путем с учетом формулы (2.19)

$$\eta_f = l_{f,z} \frac{R_b}{\sigma_f d_f} = l_{f,z} \frac{R_b \cdot \pi d_f^2}{P_f 4 \cdot d_f} = l_{f,z} \frac{R_b \cdot \pi d_f}{4 P_f}, \quad (2.19)$$

где P_f – усилие вырыва, Н;

$l_{f,z}$ – длина заделки фибр в бетоне, мм.

Если требуемая величина $l_{f,an}$ превышает половину длины использовавшихся фибр $l_{f,an} > \frac{l_f}{2}$, тогда разрушение будет сопровождаться выдергиванием всех фибр из бетона. Величина σ_0 будет при этом определяться главным образом сцеплением фибр с бетоном по контактной поверхности. Найдем эту величину.

Количество фибр, пересекших какую-либо единичную площадку, определяется

$$n_f = \frac{4\mu_f}{\pi d_f^2}. \quad (2.20)$$

Усилие, воспринимаемое одной фиброй при выдергивании

$$N_1 = \pi d_f \cdot \frac{l_f}{4} \cdot \tau_{bond}, \quad (2.21)$$

где τ_{bond} – касательное напряжение, возникающее при выдергивании одной фибры, Па.

Здесь за длину выдергиваемого участка фибры принята величина $\frac{l_f}{4}$ по следующей причине. Максимальная длина выдерга, очевидно, равняется $\frac{l_f}{2}$, а минимальная нулю. При большом количестве фибр средней длиной выдерга будет, очевидно, величина средняя между 0 и $\frac{l_f}{2}$, т.е. $\frac{l_f}{4}$.

Величина τ_{bond} получается из условия равновесия при выдергивании фибры

$$\tau_{bond} = \frac{R_f \cdot d_f}{4 l_{f,an}} = \frac{R_b}{4 \cdot \eta_f}. \quad (2.22)$$

Усилие, приходящееся на единичную площадку, перпендикулярную направлению поперечного расширения бетона, или величина бокового обжатия бетона σ_0 определяется

$$\sigma_0 = \eta_f \cdot N_1 \cdot k_s, \quad (2.23)$$

где k_s – это коэффициент, учитывающий ориентацию фибр относительно действия сжимающего усилия.

Подставив формулы 2.20, 2.21 и 2.22 в 2.23 окончательно получим

$$\sigma_0 = \frac{k_s \cdot \mu_f \cdot l_f \cdot R_b}{4 \cdot \eta_f \cdot d_f}. \quad (2.24)$$

Более распространен, однако, случай когда выдергивается лишь часть фибр, остальные фибры рвутся в предельном состоянии. Такой случай происходит, если $l_{f,an} < \frac{l_f}{2}$.

Величина бокового обжатия бетона σ_0 в этом случае определится следующим образом.

Количество фибр, пересекших единичную площадку, определяется по формуле 2.20. Вероятностью того, что фибры выдернутся, а не порвутся, будет величина

$$P_{\text{выд}} = \frac{2l_{f,an}}{l_f}. \quad (2.25)$$

Количество выдергивающихся фибр, следовательно, определится с учетом формулы 2.20

$$n_{\text{выд}} = \frac{4\mu_f}{\pi d_f^2} \cdot \frac{2l_{f,an}}{l_f}. \quad (2.26)$$

Количество обрываемых фибр равно

$$n_{\text{об}} = \frac{4\mu_f}{\pi d_f^2} \cdot \left(1 - \frac{2l_{f,an}}{l_f}\right). \quad (2.27)$$

Усилие, воспринимаемое обрывающимися фибрами, приходящееся на единичную площадку, перпендикулярную направлению поперечного расширения бетона определится

$$\sigma_0^{об} = k_s \cdot n_{об} \cdot R_f \frac{\pi d_f^2}{4}. \quad (2.28)$$

Выдергиваться будут фибры с заделкой от 0 до $l_{f,an}$. Средней длиной выдерга будет, очевидно, величина $l_{f,an}/2$. Для выдёргиваемых фибр аналогичное усилие запишется

$$\sigma_0^{выд} = k_s \cdot n_{выд} \cdot \tau_{bond} \cdot \pi d_f^2 \cdot \frac{l_{f,an}}{2}. \quad (2.29)$$

Общее усилие, приходящееся на единичную площадку, перпендикулярную направлению поперечного расширения бетона, или величина бокового обжатия бетона $\sigma_0 = \sigma_0^{об} + \sigma_0^{выд}$.

Произведя сложение с учетом формул 2.26, 2.27, 2.28 и 2.29 окончательно получим

$$\sigma_0 = k_s \cdot \mu \cdot R_f \cdot \left(1 - \frac{l_{f,an}}{l_f}\right). \quad (2.30)$$

2.4.2 Методика определения предела прочности при растяжении

Из способов косвенных испытаний на центральное растяжение предпочтение отдается расклиниванию [87]. Этот способ, благодаря своей простоте и надежности, наиболее перспективен для испытания композитных материалов, применяемых при строительстве дорог и мостов.

Рекомендуется испытывать образец удлиненной формы, при котором распределение фибры более равномерно, чем в кубическом образце. Образец имеет несколько вырезов, показан на рисунке 2.2 и соответственно несколько раз может испытываться.

Для определения деформаций в поперечном сечении элемента устанавливались индикаторы часового типа МИГ-1 с ценой деления 0,001 мм, на базе $a = 80$ мм.

Смысл предложенного метода заключается в следующем. В образце оставляются при формовании шесть продольных пазов. В пазы вставляются два

металлических силовых элемента, имеющие вид призм с двумя скошенными гранями, угол φ_{nt} между которыми равен 60° . Образец с элементами помещается между плитами испытательной машины и сжимается до разрушения, после чего по величине максимального сжимающего усилия судят о прочности материала образца на растяжение (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Испытания образца на центральное растяжение методом расклинивания

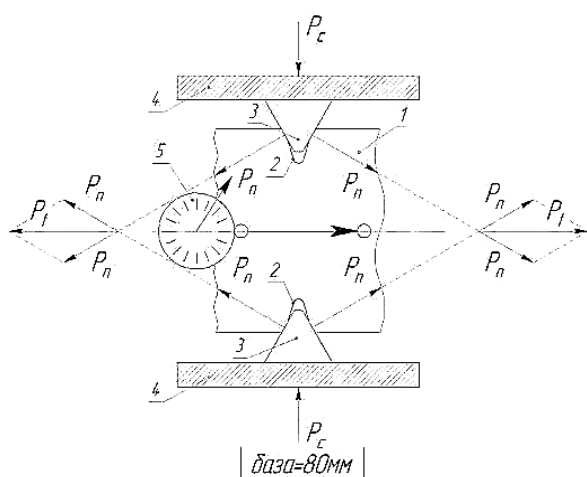


Рисунок 2.18 – Схема испытания образца призматическими элементами, расположенными в пазах: 1 – испытуемый образец, 2 – паз, 3 – силовой элемент, 4- плита прессы, 5 – индикаторы часового типа МИГ-1 с ценой деления 10^{-3} мм

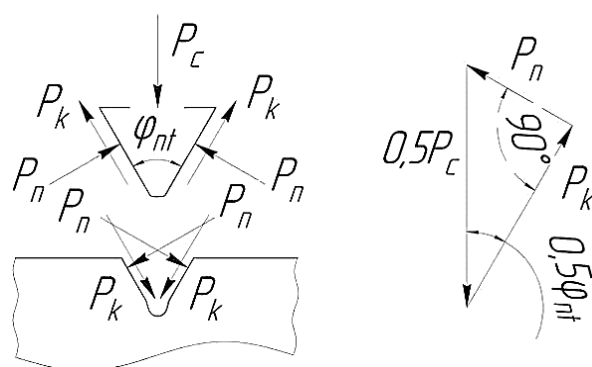


Рисунок 2.19 – Схема усилий, действующих по наклонным площадкам паза: P_n – усилие, нормальное к боковой поверхности паза; P_k – сила трения, действующая по боковой площадке паза

В процессе испытаний передача сжимающего усилия P_c , приложенного к элементам, на образец осуществляется через наклонные площадки пазов. При этом нагрузка P_c раскладывается на две составляющие: P_n и P_k показанные на рисунке 2.19.

Усилия, действующие по нормали и касательной к боковой поверхности паза (P_n и P_k , соответственно), определяются по формулам (2.31) и (2.32):

$$P_n = \frac{P_c}{2 \cdot (\sin 0,5\varphi_{nt} + f \cdot \cos 0,5\varphi_{nt})}, \quad (2.31)$$

где φ_{nt} – угол между скошенными гранями образца;

f – коэффициент трения по контактной поверхности «бетон-сталь».

$$P_k = f \cdot P_n. \quad (2.32)$$

Из формул (2.31) и (2.32) вытекает, что составляющие P_n и P_k изменяются пропорционально с ростом сжимающего усилия P_c , что обеспечивает сохранение постоянного направления передачи усилия на образец как до, так и после образования в нем трещины. Вследствие этого распределение растягивающих

напряжений σ_t в зоне раскалывания образца является равномерным в течение всего хода испытаний, что повышает точность определения предела прочности материала образца на растяжение.

Данный метод испытания сталефибробетона на растяжение позволяет достоверно определять не только его деформативность и предел трещиностойкости, но и предел прочности.

Предел прочности сталефибробетона на растяжение R_{fbt} , определяемый по вышеизложенному способу испытаний, вычисляется по формуле:

$$R_{fbt} = \frac{P_{c,u}}{b_s(h_s - 2 \cdot a_{nt})} \cdot \frac{\cos 0,5\varphi_{nt} - f \cdot \sin 0,5\varphi_{nt}}{\sin 0,5\varphi_{nt} + f \cdot \cos 0,5\varphi_{nt}}, \quad (2.33)$$

где $P_{c,u}$ – величина сжимающей нагрузки, вызывающей разрушение образца, Н;

h_s и b_s – соответственно высота и ширина образца, см;

a_{nt} – глубина паза в образце, см.

2.5 Выводы по главе 2

1. Разработана методика по оценке неравномерности распределения стальных фибр по сечению элемента (на стадии изготовления и по распилам изготовленных элементов).

2. Для проведения экспериментальных исследований и обоснования применения промышленных отходов для СФБК в работе рассмотрен отсев от дробления литого шлакового щебня производства ПАО «НЛМК» взамен кварцевого песка.

3. Для определения расслаиваемости и водоотделения растворной смеси на основе отсева дробления ЛШЩ использовали метод сопоставления содержания массы заполнителя в нижней и верхней частях свежесформованного образца.

4. Разработана методика определения оптимального зернового состава мелкого заполнителя.

5. Подробно описана методика учета неравномерного распределения фибр по матрице конструкции.

6. Определена величина бокового обжатия бетона, и предел прочности СФБ на растяжение.

7. На основании экспериментальных исследований были получены следующие охранные документы:

- патент на изобретение RU 2547348 C1 «Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона в условиях циклических нагрузжений»;

- патент на изобретение RU 2545781 C1 «Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона».

8. Необходимо провести в соответствии с предложенной методикой (п.п.2.1, 2.2) исследование влияния крупности шлакового песка и содержания фракции менее 0,14 мм на характеристики мелкозернистого шлакобетона (МЗШБ) – исходной матрицы сталефибробетона.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СФБ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МЕСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

3.1 Исследования основных физико-механических свойств конструктивного шлакопемзобетона

Прочностные и деформативные характеристики шлакопемзобетона зависят от состава заполнителей, расхода вяжущего, воды и обуславливается в конечном итоге качеством шлаковой пемзы.

Шлаковая пемза неоднородна по своим свойствам даже при получении ее из одного расплава. Отличие заключается в физико-механических свойствах: средней плотности, пористости, водопоглощению, прочности [5 – 10, 76]. В связи с чем были определены основные физико-механические свойства конструктивного шлакопемзобетона с использованием в качестве заполнителя Липецкой шлаковой пемзы, примененного в дальнейших исследованиях [84, 86, 90-92].

Кубиковая прочность шлакопемзобетона определялась в соответствии с действующим ГОСТ 18105 – 2018.

Контрольные кубики размером 100х100х100 мм изготавливались в металлических инвентарных формах с уплотнением шлакопемзобетонной смеси на лабораторной виброплощадке.

Испытание кубиков производилось после 28 дней хранения в камере нормального температурно-влажностного режима.

Перед испытанием образцы были обмерены и взвешены с целью определения средней плотности шлакопемзобетона соответствующей прочности.

Образцы доводились до разрушения, при этом скорость нагружения составляла 20 Н/см² в секунду.

Из таблицы 3.1 видно, что на шлаковой пемзе ПАО «НЛМК» можно получить конструктивный шлакопемзобетон с средней плотностью 2100 – 2200 кг/м³ классов В30 – 40 с использованием составов бетонной смеси, представленной в таблице 2.5 и 2.6.

Таблица 3.1 – Характеристики бетона

Класс бетона	Средняя плотность бетона после 28 дневного хранения, кг/м ³	Прочность* при сжатии после 28 дней нормального хранения	
		$R_{\text{разр}}$, кН	$\bar{R}$, МПа
B30	2100	330	33,6
B40	2160	380	38,0

* - по данным испытаний шести образцов-близнецов.

Для определения призмной прочности шлакопемзобетона использовались призмы размером 10х10х40 см.

Нормативная призмная прочность бетона определена по формуле

$$R_{b,n} = R_n(0,77 - 0,0001 \cdot \bar{R}), \quad (3.1)$$

где $\bar{R}$ – кубиковая прочность шлакопемзобетона, МПа;

R_n – нормативная кубиковая прочность бетона, МПа, определяемая по формуле

$$R_n = \bar{R} \cdot (1 - 1,64v), \quad (3.2)$$

где $v = 0,135$ – коэффициент вариации прочности бетона.

Отношение призмной прочности шлакопемзобетона к кубиковой составило в среднем 0,95 (Приложение А, таблица А.1).

Значение нормативной призмной прочности бетона на пористых заполнителях рекомендуемое СП 63.13330.2018, практически совпадает с полученными данными.

Более высокое сцепление цементного камня с заполнителем за счет пористой структуры и шероховатой поверхности шлаковой пемзы включает разрушение шлакопемзобетона вследствие отрыва цементного камня от зерен заполнителя.

Прочность шлакопемзобетона на растяжение при изгибе определялись на образцах-призмах размером 100х100х400 мм, подвергнутых изгибу до разрушения. Испытания производились равными сосредоточенными силами, составляющими

половину суммарной нагрузки F , приложенными на расстоянии $l/3$ пролета балочки – призмы.

Временное сопротивление бетона осевому растяжению $[R_{tf}]$ определялось по формуле:

$$R_{tf} = 0,58 \cdot \delta \cdot \frac{Fl}{a^3}, \text{ МПа} \quad (3.3)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

l – расстояние между опорами в мм;

a – сторона квадратного сечения балки в мм;

$\delta = 1,05$ – переводной коэффициент к прочности эталонной балочки размером 15x15x60 см;

0,58 – коэффициент перехода от прочности бетона на растяжение при изгибе к прочности на осевое растяжение.

Прочность шлакопемзобетона на осевое растяжение определялась путем испытания образцов-кубов.

При этом сжимающая нагрузка прикладывалась по диагонали к плоскости образца.

Образцы кубы размером 100x100x100 мм.

Два взаимно противоположных ребра, образованных боковыми гранями, были срезаны для создания опорных площадок шириной 14 мм. Испытания производились при помощи пресса.

Образец устанавливался на прессе так, чтобы плиты пресса прилегали к опорным площадкам образца. Величина предела прочности на осевое растяжение вычислялась по формуле

$$R_{bt} = \frac{F_{max}}{a^2} \cdot 0,5187, \text{ МПа} \quad (3.4)$$

где F_{max} – разрушающая нагрузка, Н;

a – длина ребра куба, мм.

Результаты определения прочности на осевое растяжение шлакопемзобетонных образцов при испытании балочек и кубиков приведены в таблице А.2 (Приложение А).

Прочность на растяжение шлакопемзобетона, полученная при испытании кубов на ребро, оказалась большей по сравнению со значениями полученными при испытании балочек на изгиб, а также больше величин, рекомендуемы СП 63.13330.2018 для соответствующей прочности шлакопемзобетона.

3.2 Определение модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона

Определение модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона класса В30 и В40 осуществлялось по методике, приведенной в главе 2. Частные значения начального модуля E можно определить по формуле

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 100, (\text{МПа}) \quad (3.5)$$

где $\Delta\sigma$ – приращение напряжения при увеличении нагрузки со ступени $0,05R_b$ до ступени $0,3R_b$, МПа;

$\Delta\varepsilon$ – разность между полной деформацией $\varepsilon_{\text{пол}}$ измеренной после выдержки под нагрузкой равной $0,3R_b$ и остаточной деформацией $\varepsilon_{\text{ост}}$, измеренной после сброса нагрузки до $0,03\sigma_b$.

Результаты проведенных опытов приведены в таблице А.3 (Приложения А). В таблицах приведены величины начального модуля упругости при испытании шлакопемзобетона классов В30 и В40.

Отмечено, что конструктивный шлакопемзобетон имеет меньший модуль упругости при сжатии по сравнению с тяжелым бетоном соответствующей прочности, но больше значений $\overline{E}_b$, рекомендуемых для бетона на пористых заполнителях в зависимости от средней плотности бетонной смеси.

3.3 Результаты испытаний по определению влияния крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси

Результаты проведенных испытаний по определению влияния крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси, приведены в таблице 3.2 и на рисунках 3.1 – 3.4.

Таблица 3.2 – Влияние крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси

Модуль крупности песка	Водоотделение (рисунок 3.1)		Расслаива- емость (рисунок 3.2)		Вязкость (рисунок 3.3)		Распływ конуса (рисунок 3.4)	
	состав 1	состав 2	состав 1	состав 2	состав 1	состав 2	песок (шлак)	песок природный
	мл/л	мл/л	-	-	Па · с	Па · с		
1,5	26,74	24	0,85	0,9	8,2	9,8	11	15
1,71	27,79	24,92	0,911	0,95	5,8	7	14	16
1,95	28,95	26,13	0,966	0,98	3,8	4,6	17	19
2,27	31,33	26,13	0,96	0,95	2,2	3,2	19	21
2,47	33,92	27,79	0,845	0,904	2,6	2,6	22	21,8
2,73	36,46	29	0,574	0,82	3,3	3	21	22
2,94	38,18	30	0,435	0,615	4,2	4	20	22,1

Опытные значения определения структурной вязкости раствора в зависимости от модуля крупности песка и удобоукладываемости МЗШБ с различным количеством фракции менее 0,14 мм приведены в таблице Б.1 и на рисунке Б.1 (Приложение Б).

Результаты определения по вышеизложенной методике области оптимальных зерновых составов песков из отсеков дробления литого шлакового

щебня производства ПАО «НЛМК» показали достаточную корреляцию с данными, полученными при испытании песков в бетонных смесях (рисунки 3.1 – 3.4, рисунок Б2).

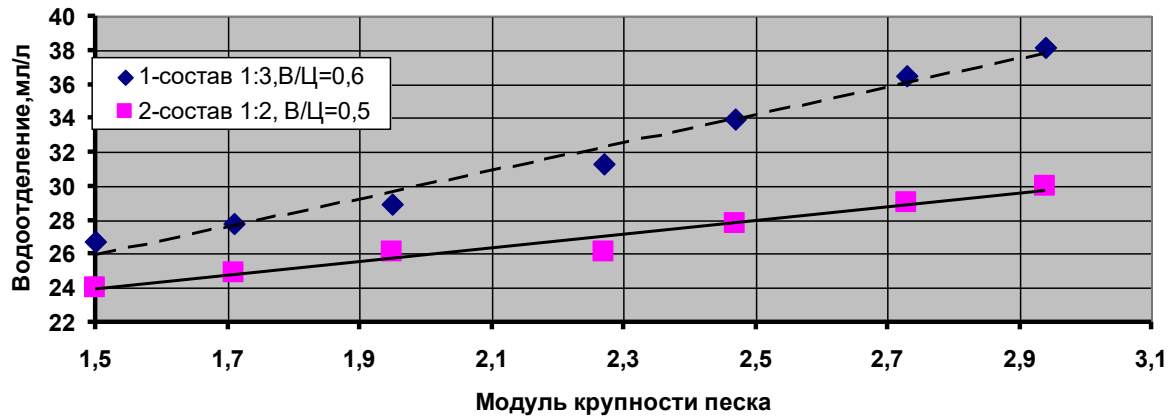


Рисунок 3.1 – Влияние крупности шлакового песка на водоотделение

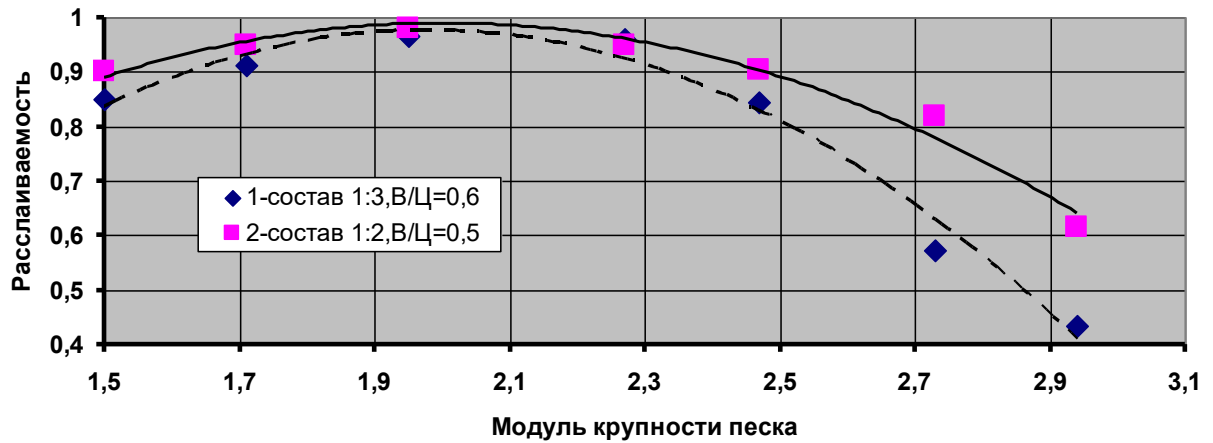


Рисунок 3.2 – Влияние крупности шлакового песка на раслаиваемость

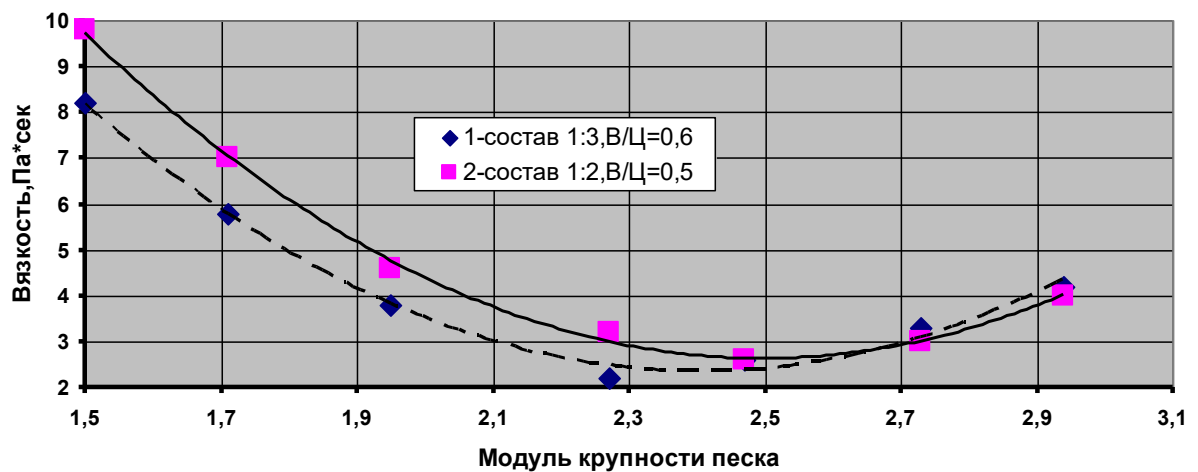


Рисунок 3.3 – Влияние крупности шлакового песка на вязкость

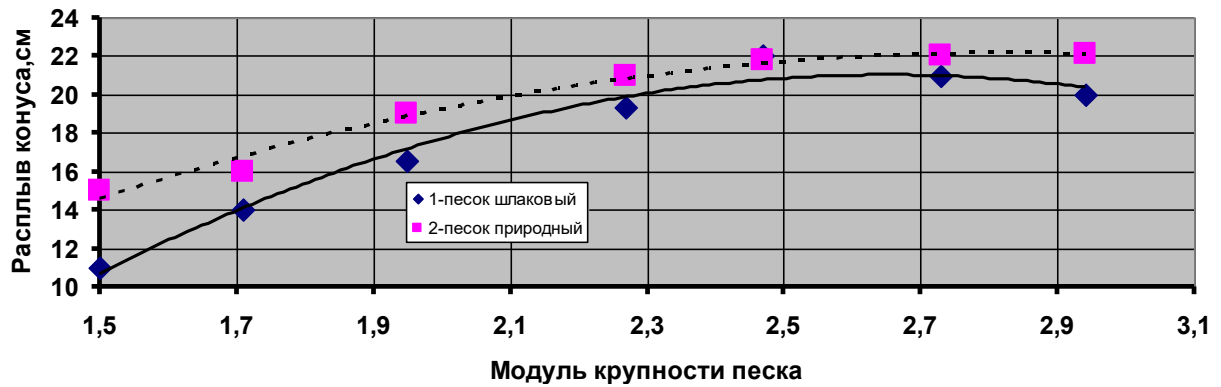


Рисунок 3.4 – Влияние крупности шлакового песка на расплыв конуса

3.4 Экспериментальные исследования плотности упаковки фибры

Для проектирования производственного состава СФШБ необходимо в первую очередь определиться с назначением диаметра и длины фибры.

Так как размеры контрольных образцов не всегда соответствуют поперечному сечению конструкций, возникла необходимость проведения дополнительных опытов для определения коэффициента уплотнения (K_y) каждого вида волокна, описанных в таблице 2.7, равного отношению уплотненного состояния ($\rho_{ф.упл.}$) к насыпному ($\rho_{ф.нас.}$). Плотность упаковки фибр в насыпном состоянии ($\theta_{нас}$) и в уплотненном ($\theta_{упл}$) представляют собой отношение к истинной плотности ($\rho = 7,8 \text{ кг/л}$). Результаты проведенных опытов с использованием объемомера приведены в таблице 3.3.

Если размеры контрольных образцов не соответствуют поперечному сечению конструкций, то проведение данных опытов позволяет осуществлять корректировку состава.

Таблица 3.3 – Определение плотности упаковки и коэффициента уплотнения
фибр в зависимости от объема формы

Объем формы, л	Средняя плотность		Плотность упаковки		Коэффициент уплотнения
	насыпная	уплотненная	насыпная	уплотненная	
	$\rho_{ф.нас.}, \text{ кг/л}$	$\rho_{ф.упл.}, \text{ кг/л}$	$\theta_{нас.}$	$\theta_{упл.}$	K_y
Фибра из стальной проволоки (прямая), $l = 97 \text{ мм}$, $d = 0,8 \text{ мм}$					
1	0,16	0,214	0,020513	0,027436	1,3375
5	0,207	0,268	0,026538	0,034359	1,294686
10	0,235	0,303	0,030128	0,038846	1,289362
Фибра из стальной проволоки (волнистая), $l = 70 \text{ мм}$, $d = 0,63 \text{ мм}$					
1	0,162	0,244	0,020769	0,031282	1,506173
5	0,209	0,288	0,026795	0,036923	1,37799
10	0,236	0,32	0,030256	0,041026	1,355932
Фибра, фрезерованная из листа, $l = 44 \text{ мм}$, $d = 0,49 \text{ мм}$					
1	0,227	0,278	0,029103	0,035641	1,22467
5	0,247	0,295	0,031667	0,037821	1,194332
10	0,261	0,311	0,033462	0,039872	1,191571
Из проволоки канатов и тросов (вторсырье), $l = 80 \text{ мм}$, $d = 1,0 \text{ мм}$					
1	0,065	0,087	0,008333	0,011154	1,338462
5	0,099	0,13	0,012692	0,016667	1,313131
10	0,104	0,136	0,013333	0,017436	1,307692
Фибра Dramix, $l = 60 \text{ мм}$, $d = 0,75 \text{ мм}$					
1	0,25	0,306	0,032051	0,039231	1,224
5	0,276	0,334	0,035385	0,042821	1,210145
10	0,28	0,335	0,035897	0,042949	1,196429

3.5 Исследование водопотребности смеси матрицы бетона

Испытания бетонной смеси для определения водоцементного отношения смеси от ее жесткости, а также зависимости жесткости смеси от В/Ц приведены в

таблице В.1 (Приложение В) и на рисунках 3.5 и 3.6. В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости водоцементного отношения смеси от ее жесткости и обратные зависимости жесткости от В/Ц.

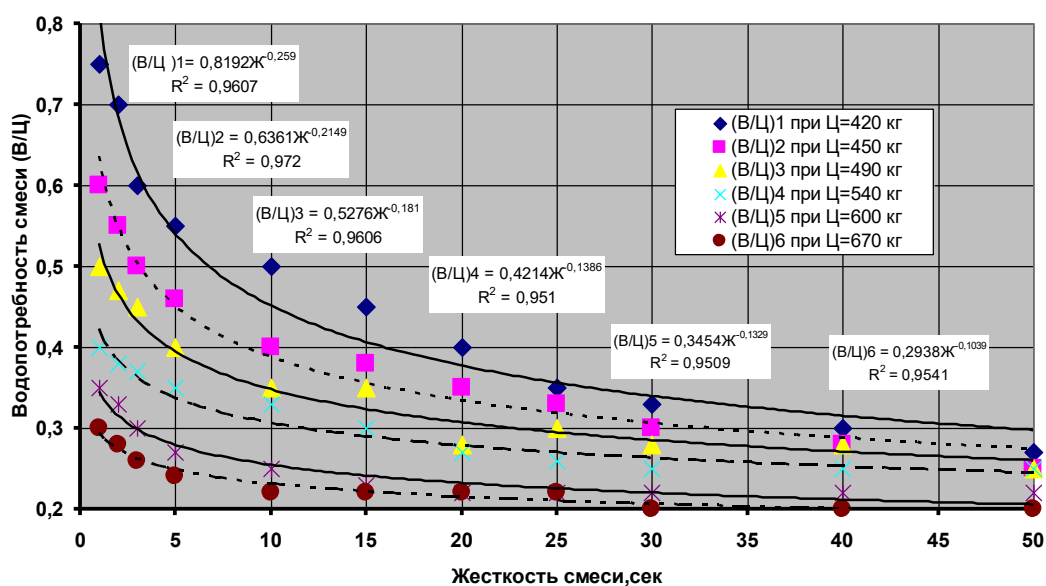


Рисунок 3.5 – Водопо́требность бетонной смеси в зависимости от ее жесткости

Получены экспериментальные зависимости $В/Ц = f(Ж)$ приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Экспериментальные зависимости водопо́требности бетонной смеси от ее жесткости

Экспериментальные зависимости водопо́требности бетонной смеси	Класс бетона	Расход цемента, кг
$В/Ц = 0,8192 \cdot Ж^{-0,259}$	В15	420
$В/Ц = 0,6361 \cdot Ж^{-0,2149}$	В20	450
$В/Ц = 0,5276 \cdot Ж^{-0,181}$	В25	490
$В/Ц = 0,4214 \cdot Ж^{-0,1386}$	В30	540
$В/Ц = 0,3454 \cdot Ж^{-0,1329}$	В35	600
$В/Ц = 0,2938 \cdot Ж^{-0,1039}$	В40	670

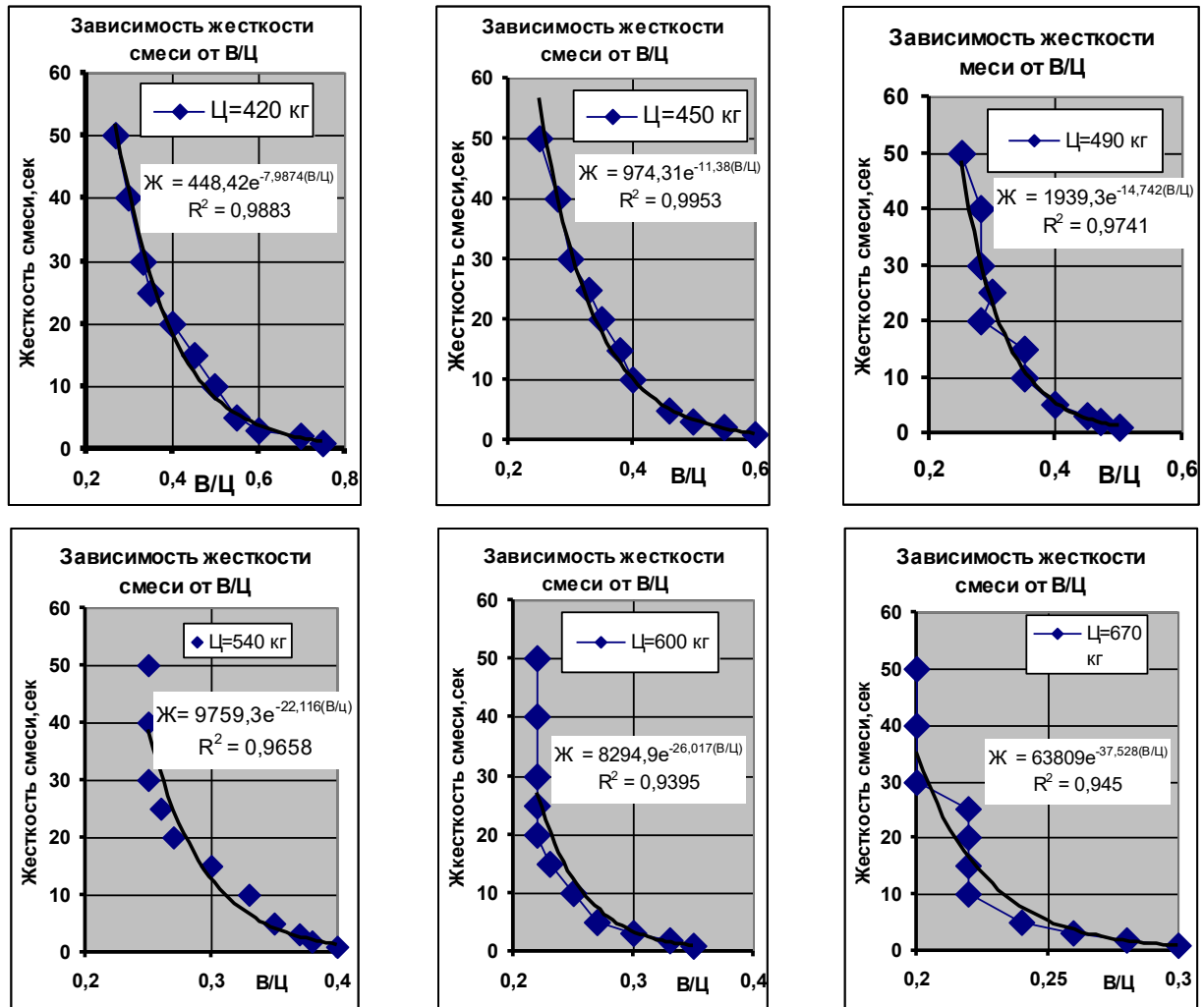


Рисунок 3.6 – Зависимость жесткости смеси (матрицы) от В/Ц

Получены экспериментальные зависимости $Ж = f(B/C)$ приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Экспериментальные зависимости жесткости смеси от водоцементного соотношения

Экспериментальные зависимости жесткости смеси от водоцементного соотношения	Класс бетона	Расход цемента, кг
$Ж = 448,42e^{-7,9874(B/C)}$	B15	420
$Ж = 974,31e^{-11,38(B/C)}$	B20	450
$Ж = 1939,3e^{-14,742(B/C)}$	B25	490
$Ж = 9759,3e^{-22,116(B/C)}$	B30	540
$Ж = 8294,9e^{-26,017(B/C)}$	B35	600
$Ж = 6380,9e^{-37,528(B/C)}$	B40	670

3.6 Исследование водопотребности фибробетонной смеси

При изготовлении конструкций из СФШБ время виброуплотнения может изменяться в пределах от 1 до 10 мин (в зависимости от жесткости смеси, параметров фибрового армирования) были проведены испытания фибробетонной смеси для определения водопотребности смеси от ее жесткости, а также зависимости жесткости смеси от В/Ц.

Результаты проведенных исследований приведены в таблице 3.6 и на рисунках В.1 – В.3 (Приложение В).

Таблица 3.6 – Жесткость сталефибробетонной смеси в зависимости от жесткости матрицы и относительной длины фибр (l/d).

Жесткость матрицы	Жесткость СФБ, сек			
сек	$l/d = 50$	$l/d = 75$	$l/d = 100$	$l/d = 125$
5	4,2	4,2	4,6	6
10	8,7	10,7	10,8	10,2
15	15	14,7	16,2	18,2
20	20,4	21,1	21,7	25,1
25	25,7	27,4	29,7	34,9
30	33,3	34,4	37,6	43,1
35	39,2	41,5	46,4	50,9
40	45,6	49,3	51,3	56,6
45	50,6	56,1	60	64,6
50	57,5	64,3	71,9	76,2

Получены экспериментальные зависимости жесткости сталефибробетонной смеси, показанные на рисунках В.1 – В.3 (Приложение В) приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Экспериментальные зависимости $\mathcal{J}_{fb} = f(\mathcal{J}, l/d, \mu_{fm})$.

$\mu_{fm}, \text{ кг}$	$l/d = 50$	$l/d = 75$	$l/d = 100$	$l/d = 125$
40	1,2Ж-2,98	1,33Ж-4,29	1,46Ж-5,23	1,58Ж-4,95
80	1,42Ж-2	3,06Ж-11	4,2Ж-7,33	4,2Ж+11,33
120	$0,3452\mathcal{J}^{1,7619}$	$1,8166\mathcal{J}^{1,4537}$	$7,6017\mathcal{J}^{1,1579}$	$14,233\mathcal{J}^{1,0327}$

3.7 Определение приведенных коэффициентов ориентации фибр

При обработке результатов испытаний на сжатие, растяжение и изгиб необходимо учитывать ориентацию фибр в расчетном сечении, как при объемном армировании (трехосная ориентация), так и при послойном армировании (плоскостная ориентация) фибрами, показанная на рисунке 3.7.

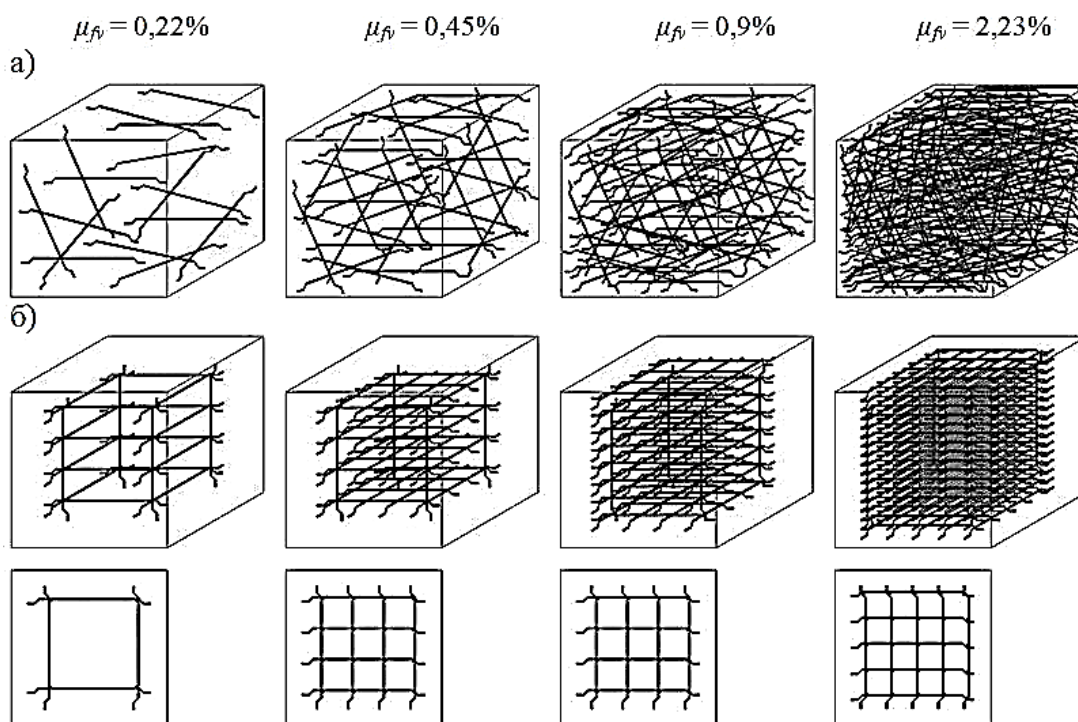


Рисунок 3.7 – Эскиз опытных образцов для испытания СФШБ на сжатие:

а – фибра расположена хаотично (трехосная ориентация), б - фибра расположена упорядоченно (плоскостная ориентация)

С целью сравнения полученных результатов изготавливались кубы с косвенным армированием в виде сеток, образующие каркасы из фибр различного вида и диаметра, показанные на рисунках Г.1 – Г.5.

Приведённые коэффициенты ориентации (K_t и K_s), определенные по формулам (2.7) и (2.8) для различных видов фибр и размеров грани поперечного сечения приведены в таблице 3.8 и на рисунках 3.8 и 3.9.

Зависимость приведённых коэффициентов ориентации (K_t) при послойной укладке бетонной смеси (ширина образца $B = 100$ мм) от высоты слоя приведена в таблице 3.6 и на рисунке 3.10.

Таблица 3.8 – Приведённые коэффициенты ориентации (K_t и K_s)

Вид фибры	Длина фибры, мм	Размер грани сечения, мм			
		40	100	100	100
		Растяжение		l/a	Сжатие
проволока гладкая	97	2,411	0,744	0,97	0,067
проволока волнистая	70	1,462	0,570	0,7	0,115
лист	44	0,840	0,432	0,44	0,166
трос	80	1,774	0,630	0,8	0,096
dramix	60	1,193	0,513	0,6	0,134

Таблица 3.9 – Приведённые коэффициенты ориентации (K_t и K_s) при послойной укладке

h (высота сечения), мм	Фибра, полученная из :				
	проволоки гладкой	проволоки волнистой	листа	троса	проволоки «Драмикс»
10	4,277941	2,405973	1,238814	3,011197	1,89244
20	1,954607	1,228872	0,739105	1,469138	1,018808
40	1,129862	0,787226	0,537374	0,903412	0,682623
60	0,904862	0,661774	0,47726	0,745252	0,58547
80	0,80172	0,603129	0,44854	0,671875	0,539689
100	0,74283	0,569248	0,431735	0,629674	0,513114

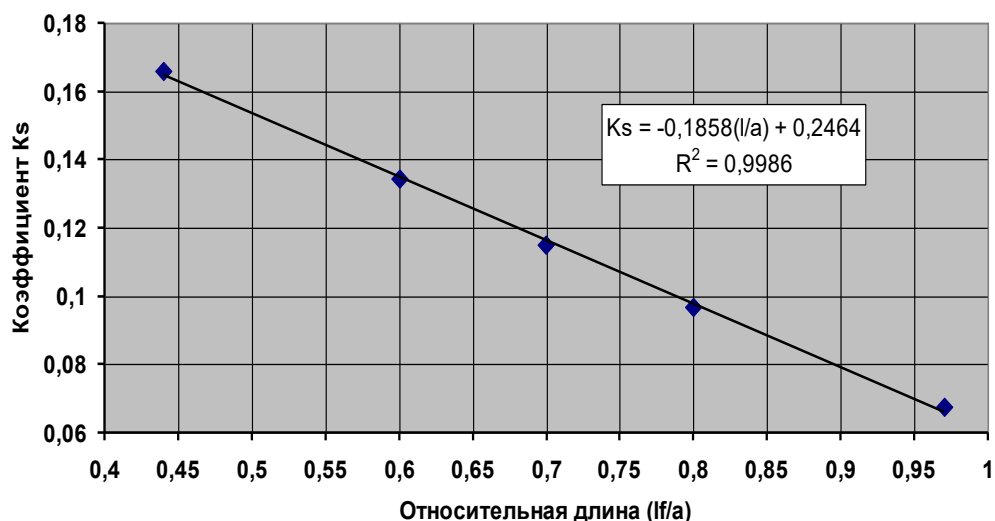


Рисунок 3.8 – Приведенные коэффициенты ориентации фибр при сжатии в зависимости от относительной длины фибры (где $a = 100\text{мм}$ -длина ребра куба)

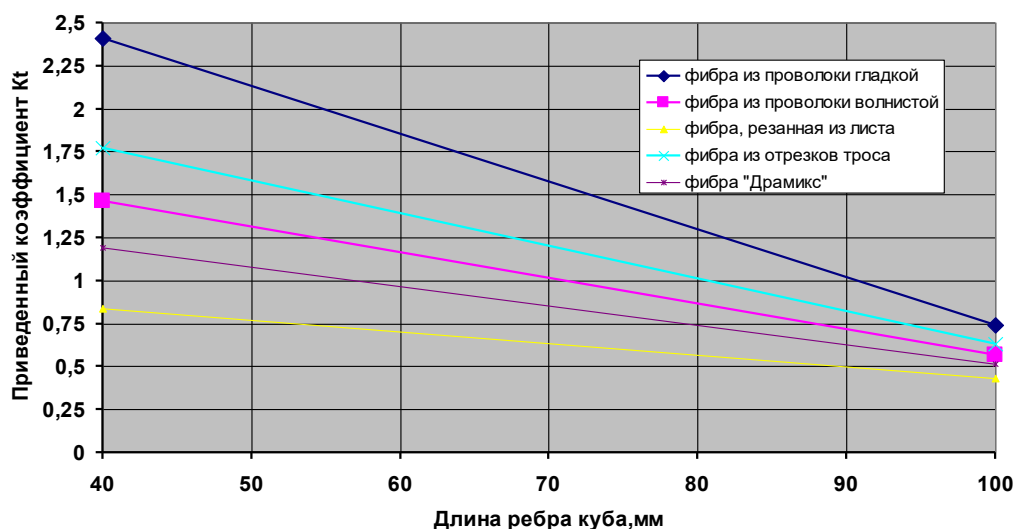


Рисунок 3.9 – Приведенные коэффициенты ориентации фибр при растяжении в зависимости от длины ребра куба

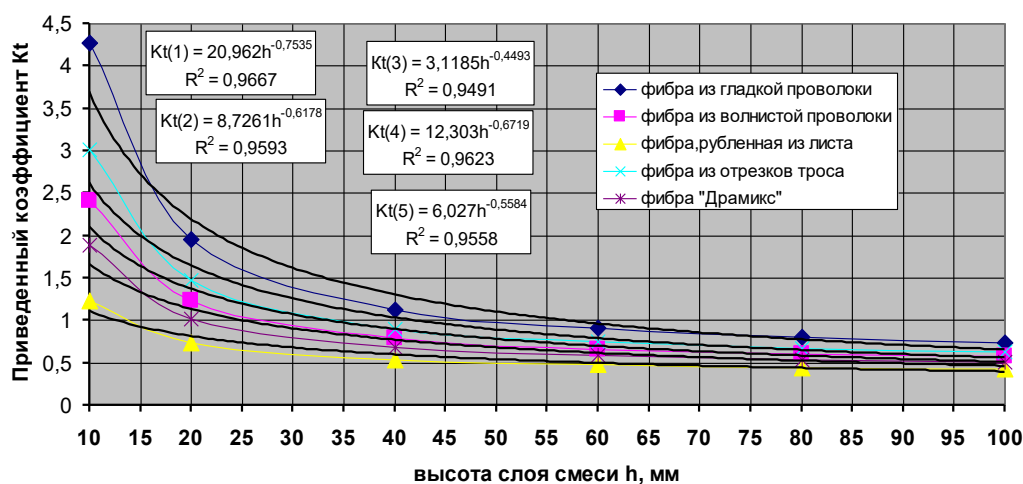


Рисунок 3.10 – Приведенные коэффициенты ориентации фибр при растяжении в зависимости от высоты сечения при ширине образца 100 мм

3.8 Исследование степени расслаиваемости фибробетонной смеси

3.8.1 Степень расслаиваемости фибробетонной смеси в стандартной форме

Так как при изготовлении конструкций из СФШБ время виброуплотнения может изменяться в пределах от 1 до 10 мин (в зависимости от жесткости смеси, параметров фибрового армирования) были проведены предварительные испытания бетонной смеси-матрицы для определения водопотребности смеси от ее жесткости, а также зависимости жесткости смеси от В/Ц приведены ранее в таблицах 3.4 и 3.5.

Исследование способности фибр опускаться в нижнюю часть формы при виброуплотнении производилась на кубах (100x100x100 мм). Уплотнение выполнялось на вибростоле при амплитуде колебаний 0,3 мм при частоте 3000 ± 200 кол.об/мин. до появления цементного молока. Время уплотнения образцов составляло от 1 до 10 мин. в зависимости от вида и процентного содержания фибровой арматуры.

Степень расслаиваемости фибр определялась по методике, приведенной в главе 2, формулы (2.11), (2.12).

Результаты определения степени расслаиваемости смеси приведены в таблицах 3.10 и Д.1 (Приложение Д).

Таблица 3.10 – Определение степени расслаиваемости смеси, армированной фиброй «Драмикс».

Жесткость смеси, сек	Время вибрирования, сек	2 слоя		k_{st} по формуле (2.1)	3 слоя			k_{st} по формуле (2.2)
		m_1 , г	m_2 , г		m_1 , г	m_2 , г	M_3 , г	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu = 0,5\%$ (фибра «Драмикс» $d_f = 0,75$ мм, $l_f = 60$ мм)								
10	9	23	16	1,098592	16	13	10	1,114286
20	30	22	17	1,068493	14	15	10	1,073394
30	60	21	18	1,04	13	15	11	1,035398

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	120	22	17	1,068493	14	15	10	1,073394
50	180	22	17	1,068493	14	14	11	1,054054
$\mu = 1,0\%$ (фибра «Драмикс» $d_f = 0,75$ мм, $l_f = 60$ мм)								
10	11	49	29	1,147059	31	32	15	1,158416
20	30	45	33	1,083333	28	29	21	1,063636
30	60	42	36	1,04	29	25	24	1,044643
40	120	43	35	1,054054	27	30	21	1,054054
50	180	43	35	1,054054	30	24	24	1,054054
$\mu = 1,5\%$ (фибра «Драмикс» $d_f = 0,75$ мм, $l_f = 60$ мм)								
10	10	73	44	1,141463	47	44	26	1,135922
20	60	80	37	1,225131	49	51	17	1,222997
30	90	73	44	1,141463	48	41	28	1,128617
40	120	67	50	1,078341	43	42	32	1,066869
50	210	68	49	1,088372	44	45	28	1,100313

3.8.2 Определение степени расслаиваемости смеси по высоте сечения с использованием методики распила образцов после испытаний на изгиб

При длительном виброуплотнении происходит опускании фибр в нижнюю часть формы, что, в свою очередь, влияет на прочность, для учета этого явления был введен коэффициент расслоения

$$k_{st} = h/h_f, \quad (3.6)$$

где h – полная высота сечения, см;

h_f – приведенная высота фибрового армирования, см: $h_f = 2Y_c$;

Y_c – расстояние от нижней грани образца до центра тяжести фибр в сечении, см.

С некоторым приближением можно принять, что все фибры располагаются в нижней части образца, имеющей высоту h_f , тогда

$$h_f = h/k_{st}. \quad (3.7)$$

Коэффициент армирования в зоне с высотой h_f определяется:

- при равномерном распределении фибр по высоте сечения коэффициент армирования

$$\mu_{fv} = V_f/V_b, \quad (3.8)$$

где V_f – объем армирующих фибр, м³;

V_b – объем бетона, где $V_b = bhL$ для прямоугольного элемента, м³;

L – длина элемента, м³: принимаем $L = 1$ м³.

- при опускании фибр коэффициент армирования составит

$$\mu'_{fv} = V_f/V'_b. \quad (3.9)$$

где V'_b – объем бетона, в котором распределены фибры, м³ $V'_b = bh_fL$.

Выразим объем арматуры из формул (3.8) и (3.9) и получим:

$$V_f = \mu_{fv}bh; \quad (3.10)$$

$$V_f = \mu'_{fv}bh_f.$$

Из этих выражений выразим коэффициент армирования зоны с высотой h_f

$$\mu'_{fv} = \mu_{fv}h/h_f, \quad (3.11)$$

Так как по определению $k_{st} = \frac{h}{h_f}$ из формулы 3.7, тогда:

$$\mu'_{fv} = \mu_{fv}k_{st}. \quad (3.12)$$

Распределение фибр по высоте сечения образцов, определяемое по методике, описанной в главе 2, приведен на рисунке 3.11 и рисунках Д.1 – Д.4.

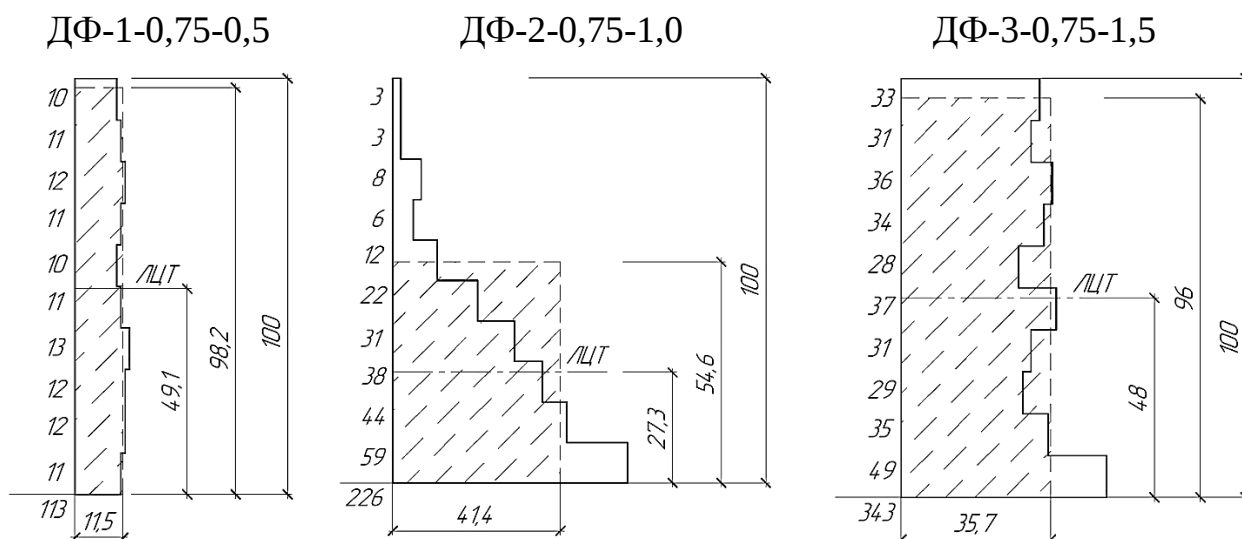


Рисунок 3.11 – Распределение фибры производства Бекарт-dramix

Значения коэффициента расслоения k_{st} в зависимости от времени вибрации, диаметра и длины фибр, а также коэффициента объемного армирования приведены в таблицах 3.11 и Д.2.

Таблица 3.11 – Коэффициенты расслоения фибробетонной смеси по результатам распилов

Марка образца	Время вибрации, сек	Размеры фибр (d_f/l_f), мм/мм	μ_{fv}	k_{st}
ДФ-1-0,75-0,5	7	0,75/60	0,005	1,019
ДФ-2-0,75-0,5	180	0,75/60	0,010	1,831
ДФ-3-0,75-0,5	8	0,75/60	0,015	1,042

3.9 Определение характеристики сцепления фибр с бетоном

Прочность анкеровки фибр в бетоне является основой прочности сталефибробетонных конструкций.

Исследование анкеровки фибры в бетоне производилось по методике, изложенной в главе 2. Закрепление опытных образцов в зажимах экспериментальной установки, показанной на рисунке 2.16 при определении характеристики сцепления фибры с бетоном матрицы приведено на рисунке 3.12.

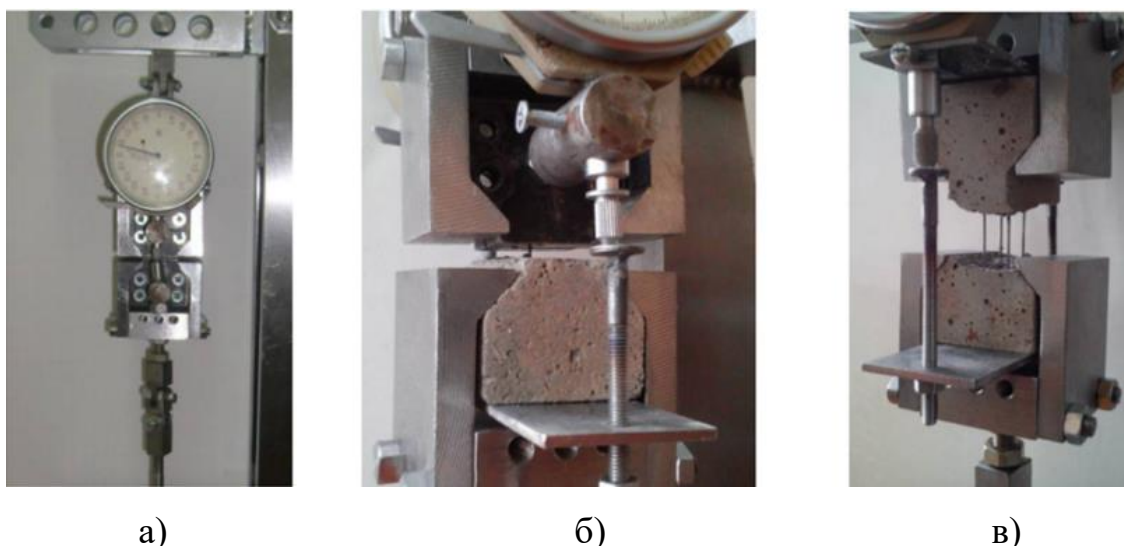


Рисунок 3.12 – Закрепление опытных образцов в зажимах экспериментальной установки: а) при испытании фибры на разрыв, б) при испытании прочности анкеровки фибры в шлакобетонном элементе, в) при испытании фиброшлакобетонного образца с несколькими фибрами

Характеристика сцепления фибр с бетоном определялась опытным путем с учетом формулы (2.19)

$$\eta_{f,exp} = l_{f,z} \frac{R_b \cdot A_f}{P_f \cdot d_f}, \quad (3.13)$$

где P_f – усилие вырыва, Н;

A_f – площадь поперечного сечения фибры, мм²;

$l_{f,z}$ – длина заделки фибр в бетоне, мм.

Результаты опытов при выдергивании применяемых видов фибр из бетона при различной прочности матрицы и заделки фибр приведены в таблицах 3.12 и Е.2.

Таблица 3.12 – Определение характеристики сцепления фибры, рубленной из стальной проволоки «Драмикс» ($A_f = 0,442 \text{ мм}^2$), с бетоном-матрицей

Прочность бетона, R_b , МПа	$\frac{l_{f,z}}{d_f}$	Усилие вырыва, P , Н	$\eta_{f,exp}$	$\frac{\eta_{f,exp} - \eta_{f,расч}}{\eta_{f,расч}} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5
фибры, рубленные из стальной проволоки «Драмикс» ($A_f = 0,442 \text{ мм}^2$)				
29,5	13,33	210	0,82	-8,10516

Продолжение таблицы 3.12

1	2	3	4	5
31,4	13,33	220	0,84	-6,63258
28,9	13,33	180	0,94	5,030093
29,5	26,66	370	0,93	4,313063
31,4	26,66	400	0,92	2,704167
28,9	26,66	370	0,91	2,191441
29,5	40	600	0,86	-3,51042
31,4	40	610	0,90	1,020492
28,9	40	540	0,94	5,030093

Примечание. Расчетное значение характеристики сцепления фибры «Dramix»
 - $\eta_{f, \text{расч}} = 0,9$.

3.10 Экспериментальное определение прочностных и деформативных характеристик СФШБ

При испытании стандартных кубиков с размерами ребра 100 мм на осевое сжатие определялись предел прочности и деформации по образцам, показанным на рисунке 3.13.

Призменная прочность определялась по результатам испытаний призм сечением 100x100 мм. Опытные значения прочности СФШБ при сжатии R_{fb} для фибры серии ДФ приведены в таблице 3.13, для остальных серий- в таблице Ж.2.

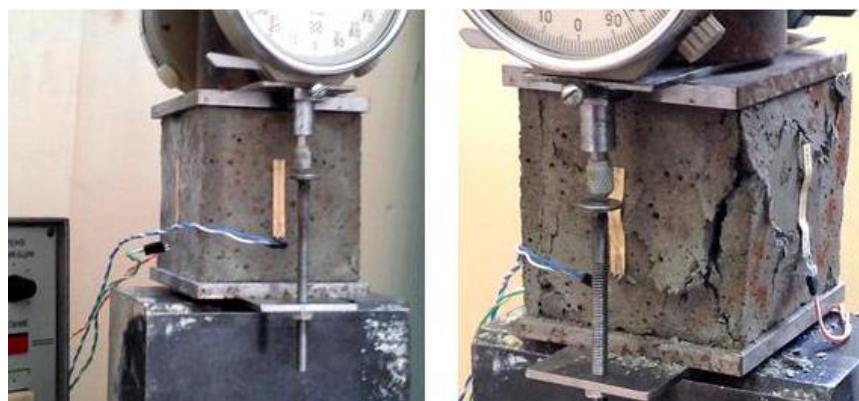


Рисунок 3.13 – Фотоиллюстрации испытаний СФШБ образцов на осевое сжатие

Таблица 3.13 – Опытные значения прочности СФШБ при сжатии (серия ДФ-фибра «Dramix» бельгийской фирмы «Бекарт»)

μ_{fv}	Прочность матрицы					
	$R_{b,exp} = 29,5 \text{ МПа}$		$R_{b,exp} = 31,4 \text{ МПа}$		$R_{b,exp} = 28,9 \text{ МПа}$	
	$R_{fb,exp(2)}$	$R_{fb,exp(3)}$	$R_{fb,exp(2)}$	$R_{fb,exp(3)}$	$R_{fb,exp(2)}$	$R_{fb,exp(3)}$
0,005	34,1	32,2	35,4	34,2	33,6	31,7
0,01	38,1	33,3	39,2	36,2	36,8	33,5
0,015	42,1	36,4	44,1	38,1	42,2	35,2

Примечания: $R_{fb,exp(2)}$, $R_{fb,расч(2)}$ – опытные и расчетные значения прочности при плоскостной ориентации фибр; $R_{fb,exp(3)}$, $R_{fb,расч(3)}$ – опытные и расчетные значения прочности при трехосной ориентации фибр

Изменение призмочной прочности СФШБ в зависимости от объемного процента армирования фиброй и ее ориентации на примере использования гладкой фибры приведено на рисунке 3.14.

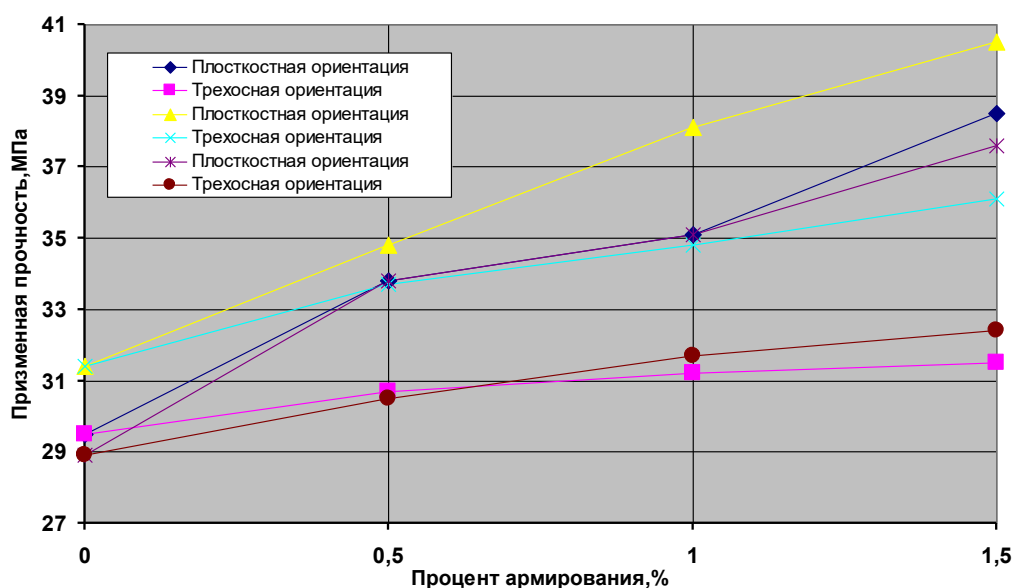


Рисунок 3.14 – Изменение призмочной прочности СФШБ в зависимости от объемного процента армирования фиброй (серия П(г)Ф)

Диаграмма деформирования СФШБ при сжатии в зависимости от объемного процента армирования фиброй и ее ориентации на примере использования гладкой фибры приведена на рисунке 3.15.

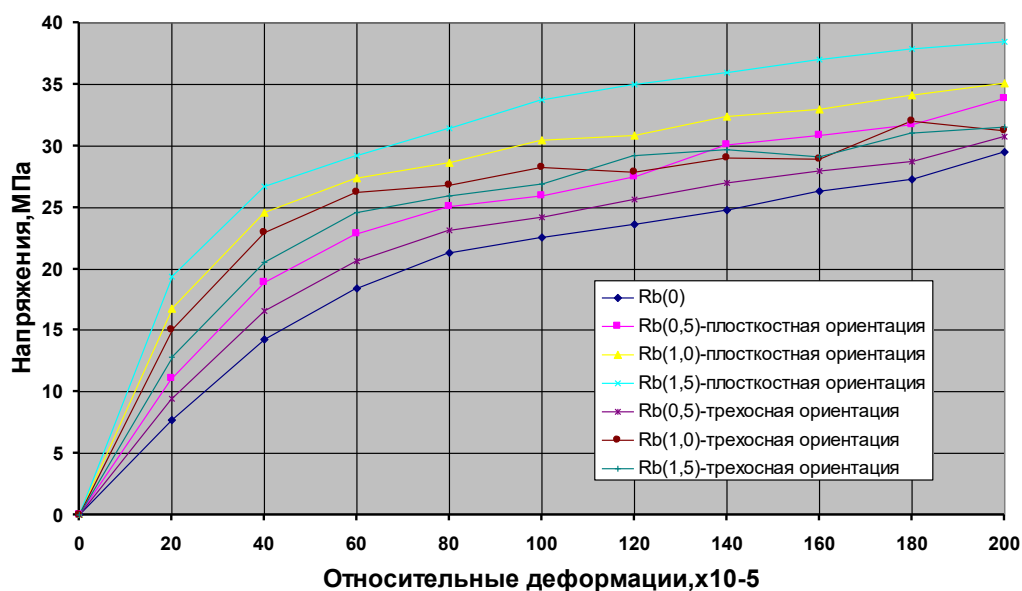


Рисунок 3.15 – Диаграмма деформирования СФШБ при сжатии (серия П(г)Ф)

Испытания образцов на осевое растяжение проводились по методике, изложенной в главе 2 (п.2.4.2), при этом определялись предел прочности и деформации на образцах, показанных на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Определение прочностных и деформативных характеристик при растяжении

Экспериментальное определение прочности СФШБ по методике, изложенной в главе 2, при классе бетона В30 приведено в таблице 3.14.

Изменение прочности СФШБ при растяжении в зависимости от объемного процента армирования фиброй и ее ориентации на примере использования гладкой фибры приведена на рисунке 3.17.

Таблица 3.14 – Прочность образцов из СФШБ при центральном растяжении (R_{fbt}), МПа

Серия образца	K_t	Коэффициент объемного армирования, μ_v			
		0	0,05	0,01	0,015
П(г)Ф	0,743	1,8	2,3	2,9	3,1
П(в)Ф	0,569	1,9	3,41	4,64	6,34
ЛФ	0,432	1,8	2,51	3,65	4,17
ТФ	0,630	1,8	2,2	2,9	2,95
ДФ	0,513	1,8	3,16	4,8	5,95

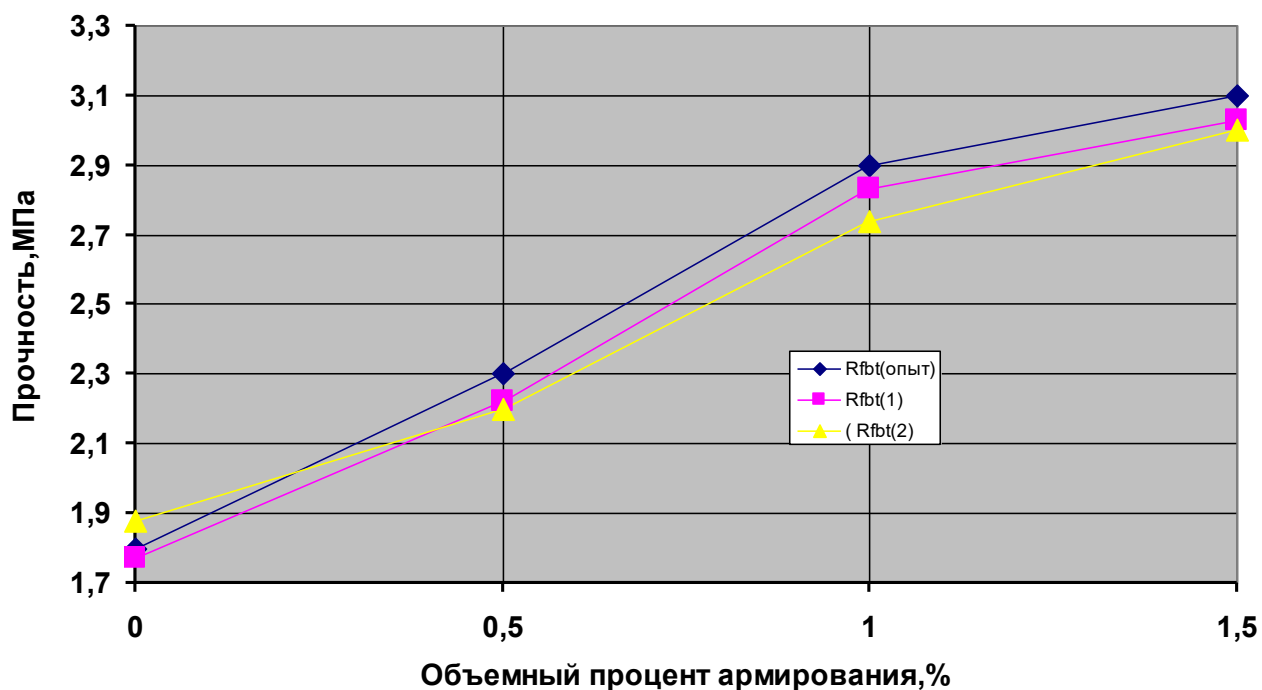


Рисунок 3.17 – Изменение прочности СФШБ при растяжении в зависимости от объемного процента армирования фиброй (серия П(г)Ф)

Диаграмма деформирования СФШБ при растяжении в зависимости от объемного процента армирования фиброй и ее ориентации на примере использования гладкой фибры приведена на рисунке 3.18.

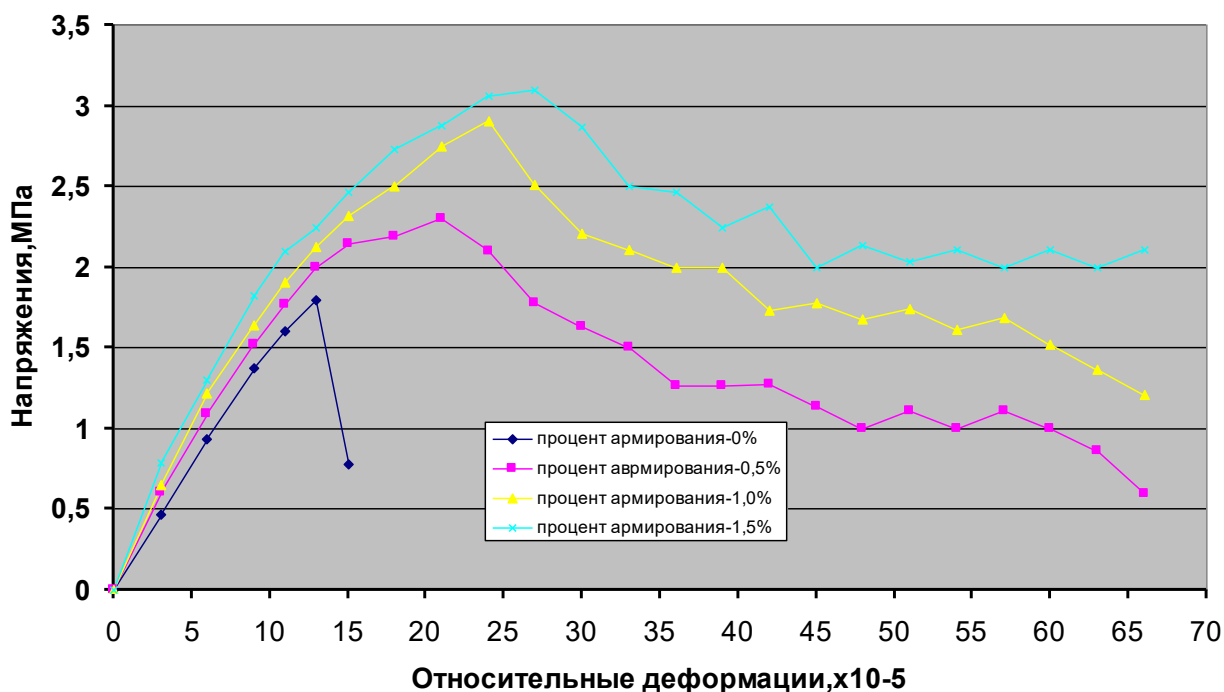


Рисунок 3.18 – Диаграмма деформирования СФШБ при растяжении (серия П(г)Ф)

3.11 Результаты экспериментальных исследований прочности СФШБ элементов при изгибе с возможной неоднородностью фибрового армирования

В данном разделе рассмотрены исследования влияния неравномерности распределения фибр по высоте сечения на прочность элемента при изгибе.

Исследование способности фибр опускаться в нижнюю часть формы при виброуплотнении и влияния ее на прочность при изгибе производилось на балочках размерами 100x100x400 мм.

Опытные исследования степени расслаиваемости смеси по высоте сечения с использованием методики распила образцов после испытаний на изгиб приведены в разделе 3.7.2.

При испытаниях СФШБ балочек на изгиб отмечалось их пластическое разрушение. Результаты испытаний приведены в таблице 3.15.

Так как разрушение происходит всегда по слабому сечению, то распил в месте разрушения достаточно точно определит количество фибр, участвующих в работе сечения, и их распределение. Поэтому после испытаний образцы распиливались корундовым диском по месту разрушения. В распилах

подсчитывалось число фибр и определялось их распределение по высоте сечения. Эпюры распределения фибр экспериментальных образцов приведены на рисунке 3.18. При этом количество фибр суммировалось по каждому слою высотой 10 мм.

Таблица 3.15 – Характеристики образцов, испытанных на изгиб

Марка образца	R_b , МПа	R_{fbt} , МПа	Кол-во фибр	μ_v	K_t	K_{st}	$M_{разр}$, кН·м
1	2	3	4	5	6	7	8
Фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки по ГОСТ 3282-744 ($d_f = 0,8$ мм, $l_f = 97$ мм, $R_{sf} = 690$ МПа)							
П(Г)Ф-1-0,8-0,5	29,5	2,20	102	0,0051	0,745	1,010	1,02
П(Г)Ф-2-0,8-1,0	31,4	3,0	203	0,010	0,924	1,742	1,18
П(Г)Ф-3-0,8-1,5	28,9	3,06	303	0,015	0,755	1,051	1,38
Фибра из проволоки волнистого очертания ($d_f = 0,63$ мм, $l_f = 70$ мм, $R_{sf} = 680$ МПа)							
П(В)Ф-1-0,63-0,5	29,5	3,49	168	0,0052	0,570	1,005	1,54
П(В)Ф-2-0,63-1,0	31,4	4,87	315	0,01	0,639	1,509	2,11
П(В)Ф-3-0,63-1,5	28,9	6,25	481	0,015	0,578	1,069	2,52
Фибра из листа прямоугольного сечения ($d_f = 0,49$ мм, $l_f = 44$ мм, $R_{sf} = 450$ МПа)							
ЛФ-1-0,49-0,5	29,5	2,63	275	0,0052	0,432	1,005	1,20
ЛФ-2-0,49-1,0	31,4	3,51	539	0,010	0,474	1,627	1,42
ЛФ-3-0,49-1,5	28,9	4,15	788	0,015	0,439	1,102	1,81
Фибра из троса волнистого очертания ($d_f = 1,0$ мм, $l_f = 80$ мм, $R_{sf} = 1200$ МПа)							
ТФ-1-1,0-0,5	29,5	2,11	58	0,0046	0,630	1,003	0,98
ТФ-2-1,0-1,0	31,4	2,78	150	0,012	0,721	1,531	1,17

Продолжение таблицы 3.15

1	2	3	4	5	6	7	8
ТФ-3-1,0-1,5	28,9	2,89	193	0,015	0,637	1,042	1,31
Фибра рубленая из стальной проволоки (аналог фибры «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт») ($d_f = 0,75$ мм, $l_f = 60$ мм, $R_{sf} = 1100$ МПа)							
ДФ-1-0,75-0,5	29,5	3,22	113	0,005	0,515	1,019	1,44
ДФ-1-0,75-0,5	31,4	4,98	226	0,010	0,604	1,831	1,86
ДФ-1-0,75-0,5	28,9	6,16	343	0,015	0,517	1,042	2,47

Примечание: Пролет балочек 300 мм, изгиб производился двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета, коэффициент фибрового армирования подсчитан по формуле $\mu_{fv} = n\pi d_f^2/4A$.

3.12 Выводы по главе 3

1. Определены основные физико-механические свойства конструктивного шлакопемзобетона с использованием в качестве заполнителя Липецкой шлаковой пемзы для дальнейших исследований.
2. Выведены коэффициенты уплотнения каждого вида фибровых волокон для конкретного расчета реальных СФБК.
3. Определено влияние времени виброуплотнения на опускание стальных фибр в конструкции.

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ПРОЧНОСТЬ СФШБ

4.1 Анализ результатов исследований составляющих бетонной матрицы

4.1.1 Рекомендации по выбору оптимальной гранулометрии шлакового песка

Выбор оптимальной гранулометрии шлакового песка производился не в бетонах, а в растворах, что значительно ускоряет и упрощает проведение испытаний.

Как указано в главе 3, в качестве критериев оптимальности при выборе зернового состава мелкого заполнителя следует учитывать структурную вязкость и расслаиваемость растворной смеси.

На основании проведенных испытаний, описанных ранее, получены опытные зависимости реологических характеристик раствора от зернового состава песка, позволяющие выбрать оптимальный зерновой состав измельченного шлакового песка в пределах возможностей принятого дробильного оборудования:

- водоотделение, мл/л:

$$(Ц/П = 1:3, В/Ц = 0,6), \quad П_в(1) = 8,22 \cdot M_{кр} + 13,63; \quad (4.1)$$

$$(Ц/П = 1:2, В/Ц = 0,5), \quad П_в(2) = 4,01 \cdot M_{кр} + 17,94. \quad (4.2)$$

- расслаиваемость:

$$(Ц/П = 1:3, В/Ц = 0,6), \quad K_p(1) = -0,615 \cdot M_{кр}^2 + 2,432 \cdot M_{кр} - 1,43; \quad (4.3)$$

$$(Ц/П = 1:2, В/Ц = 0,5), \quad K_p(2) = -0,396 \cdot M_{кр}^2 + 1,583 \cdot M_{кр} - 0,595. \quad (4.4)$$

- вязкость, Па·с:

$$(Ц/П = 1:3, В/Ц = 0,6), \quad \eta(1) = 7,078 \cdot M_{кр}^2 - 34,06 \cdot M_{кр} + 43,34; \quad (4.5)$$

$$(Ц/П = 1:2, В/Ц = 0,5), \quad \eta(2) = 7,126 \cdot M_{кр}^2 - 35,602 \cdot M_{кр} + 47,09. \quad (4.6)$$

- подвижность по ГОСТ 310.4 (удобоукладываемость, см):

$$(Ц/П = 1:3, В/Ц = 0,6), \quad П(1) = -7,81 \cdot M_{кр}^2 + 41,42 \cdot M_{кр} - 33,89; \quad (4.7)$$

$$(\Pi/\Pi = 1:2, B/\Pi = 0,5), P(2) = -4,31 \cdot M_{кр}^2 + 24,41 \cdot M_{кр} - 12,35. \quad (4.8)$$

- жесткость, с:

$$(МЗШБ В20), Ж(1) = 41,88 \cdot M_{кр}^2 - 165,17 \cdot M_{кр} + 183,77; \quad (4.9)$$

$$(МЗШБ В22,5), Ж(2) = 46,70 \cdot M_{кр}^2 - 175,77 \cdot M_{кр} + 189,82; \quad (4.10)$$

$$(МЗШБ В30), Ж(3) = 91,12 \cdot M_{кр}^2 - 343,33 \cdot M_{кр} + 346,89. \quad (4.11)$$

- структурная вязкость, Па·с:

$$(\phi p \leq 0,14, \%), \eta = 0,007 \cdot \phi p^2 - 0,187 \cdot \phi p + 3,335. \quad (4.12)$$

4.1.2 Анализ плотности упаковки фибры

В результате обработки экспериментальных данных по определению плотности упаковки и коэффициента уплотнения фибр в зависимости от объема формы (таблица 3.3, глава 3) получены результаты зависимостей коэффициента уплотнения фибровой арматуры (K_y) от площади поперечного сечения образца (A) и геометрических характеристик фибры (длины – l , диаметра – d):

- гладкая фибра:

$$K_y = -0,033 \ln \left(\frac{A}{ld} \right) + 1,494; \quad (4.13)$$

- волнистая фибра:

$$K_y = -0,102 \ln \left(\frac{A}{ld} \right) + 2,049; \quad (4.14)$$

- фибра из листа:

$$K_y = -0,023 \ln \left(\frac{A}{ld} \right) + 1,362; \quad (4.15)$$

- фибра из троса:

$$K_y = -0,021 \ln \left(\frac{A}{ld} \right) + 1,437; \quad (4.16)$$

- фибра «Драмикс»:

$$K_y = -0,017 \ln \left(\frac{A}{ld} \right) + 1,317. \quad (4.17)$$

Прогнозирование коэффициента уплотнения фибровой арматуры (K_y) от площади поперечного сечения образца (A) и геометрических характеристик различной фибры с использованием формул (4.13) – (4.17) показано на рисунках 4.1 – 4.5.

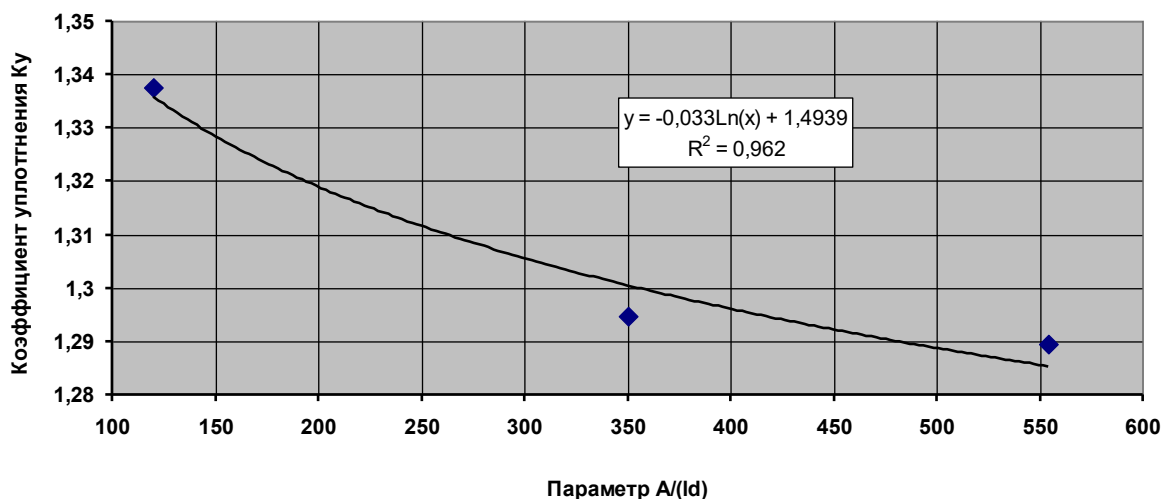


Рисунок 4.1 – Зависимость коэффициента уплотнения фибровой арматуры от площади поперечного сечения образца и геометрических характеристик фибры (фибра из гладкой проволоки)

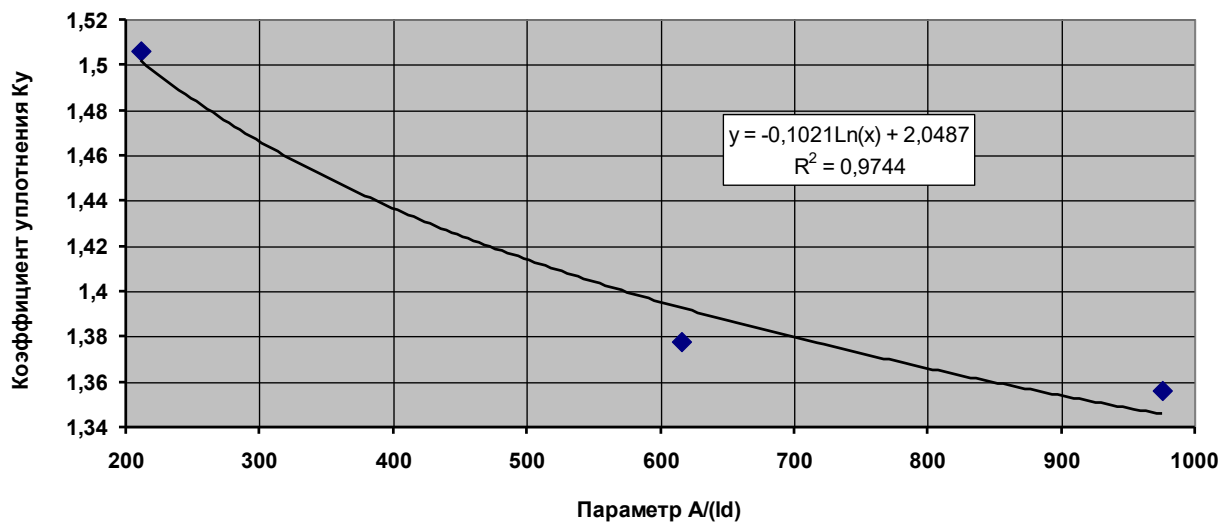


Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента уплотнения фибровой арматуры от площади поперечного сечения образца и геометрических характеристик фибры (фибра из волнистой проволоки)

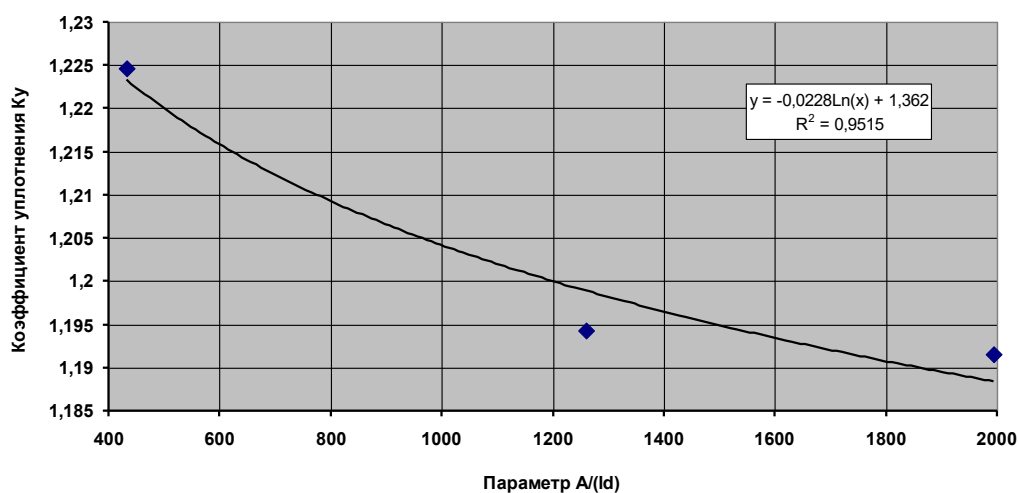


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента уплотнения фибровой арматуры от площади поперечного сечения образца и геометрических характеристик фибры (фибра рубленная из листа)

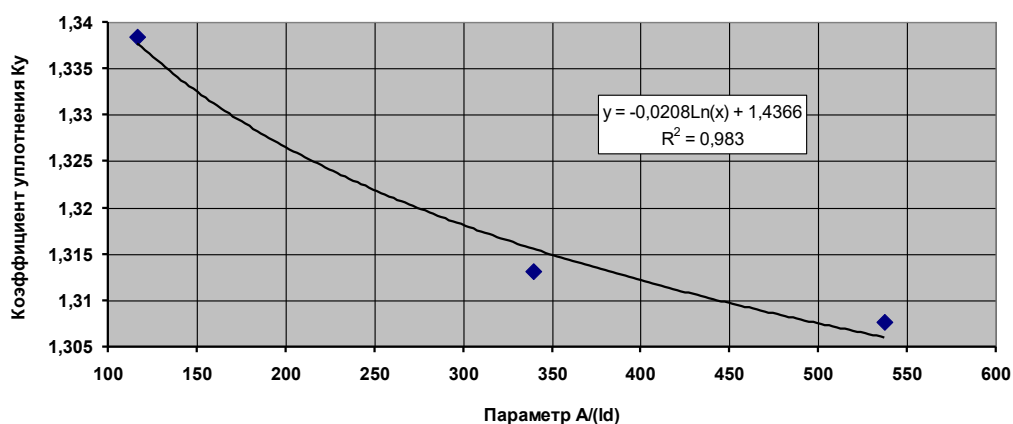


Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициента уплотнения фибровой арматуры от площади поперечного сечения образца и геометрических характеристик фибры (фибра из троса)

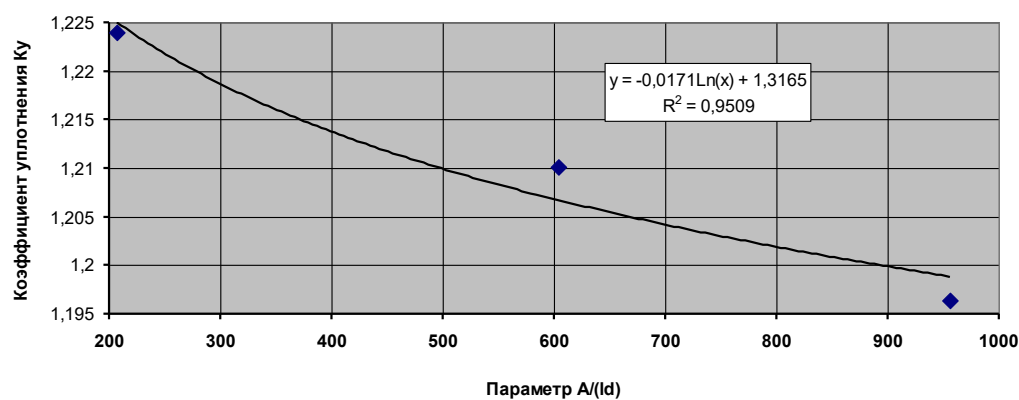


Рисунок 4.5 – Зависимость коэффициента уплотнения фибровой арматуры от площади поперечного сечения образца и геометрических характеристик фибры (фибра «Dramix»)

4.1.3 Влияние технологии изготовления на степень расслаиваемости фибр

В результате обработки опытов, описанных в главе 3, по определению экспериментальных значений коэффициента степени расслаиваемости фибр получены зависимости K_t от жесткости смеси бетонной матрицы, диаметра фибр и времени вибрирования фибробетонной смеси:

$$k_{st} = -0,475 \cdot \ln \left(\frac{Ж}{\sqrt{d_f t_{exp}}} \right) + 1,75, \quad (4.18)$$

где t_{exp} – время вибрирования фибробетонной смеси, с;

$Ж$ – жесткости смеси бетонной матрицы, с;

d_f – диаметр фибры, мм.

Используя исходные данные (жесткость смеси, диаметр применяемой фибры и степень расслаиваемости фибр k_{st}) можно прогнозировать расчетное время укладки фибробетона:

$$t = Ж^2 / d_f \cdot EXP((k_{st} - 1,75) \cdot 4,2). \quad (4.19)$$

Результаты сравнения опытных и расчетных значений степени расслаиваемости фибр и времени вибрирования фибробетонной смеси с расчетным временем укладки фибробетонной смеси приведены в приложении Д.

В таблицах Д.5 и Д.6 приведены сравнительные данные определения степени расслаиваемости фибры при изготовлении образцов, подверженных испытаниям на изгиб, по распилам и по формулам (4.18) и (4.19).

4.2. Контроль и корректировка подобранного состава СФШБ

Результаты математической обработки исследований (глава 3, п. 3.6) для определения первоначальной водопотребности смеси при различных интервалах требуемой жесткости приведены на рисунках 4.6 – 4.9.

Полученные зависимости водопотребности смеси для различных классов бетона, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Зависимости водопотребности смеси для различных классов бетона

$3с < Ж < 10с$	$10с < Ж < 20с$	$20с < Ж < 30с$	$30с < Ж < 50с$	Класс бетона
$B_c = -5,73Ж + 266,1$	$B_c = -3,2Ж + 243,3$	$B_c = -97,1\ln Ж + 467,3$	$B_c = -21,8\ln Ж + 212,7$	B15
$B_c = -7,15Ж + 250,2$	$B_c = -1,9Ж + 200,2$	$B_c = -59,8\ln Ж + 339,1$	$B_c = -25,7\ln Ж + 224$	B20
$B_c = -6,38Ж + 239,3$	$B_c = -1,9Ж + 195,2$	$B_c = -57,4\ln Ж + 328,8$	$B_c = -23,9\ln Ж + 215,5$	B25
$B_c = -4,77Ж + 216,6$	$B_c = -2,4Ж + 195,3$	$B_c = -34,1\ln Ж + 248,9$	$B_c = -19,8\ln Ж + 199$	B30
$B_c = -3,42Ж + 194,5$	$B_c = -2Ж + 180$	$B_c = -26,8\ln Ж + 221,9$	$B_c = -19,8\ln Ж + 197$	B35
$B_c = -3,54Ж + 183,6$	$B_c = -1,6Ж + 165,7$	$B_c = -12,4\ln Ж + 170$	$B_c = -15,9\ln Ж + 181,7$	B40

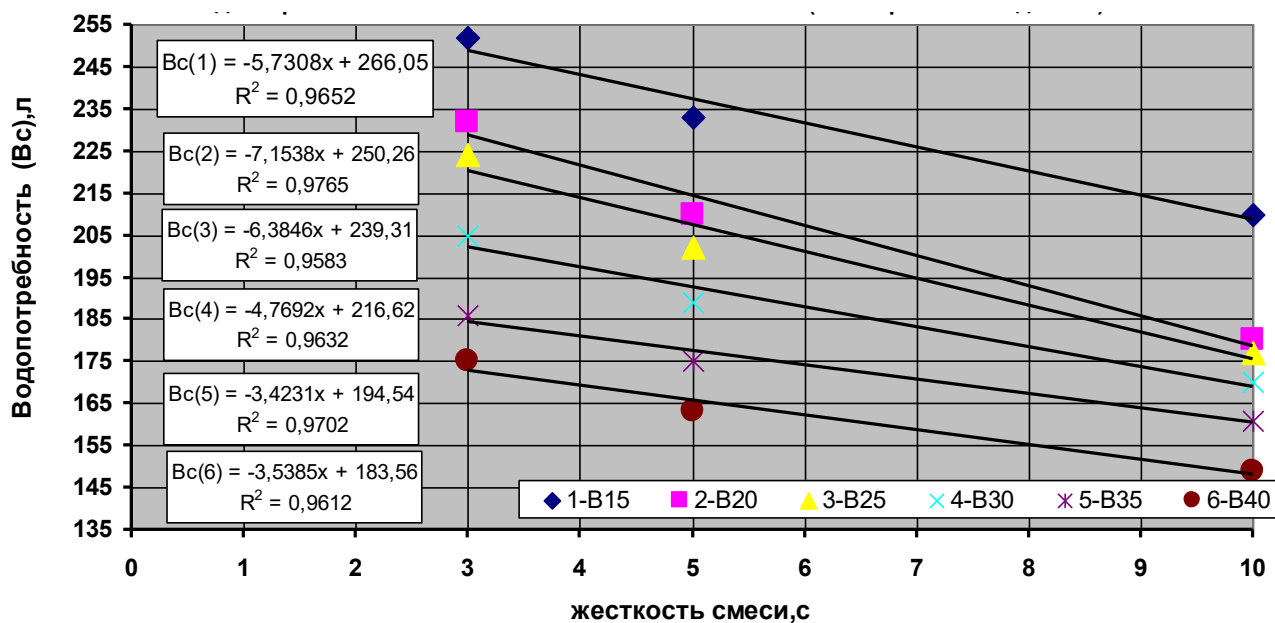
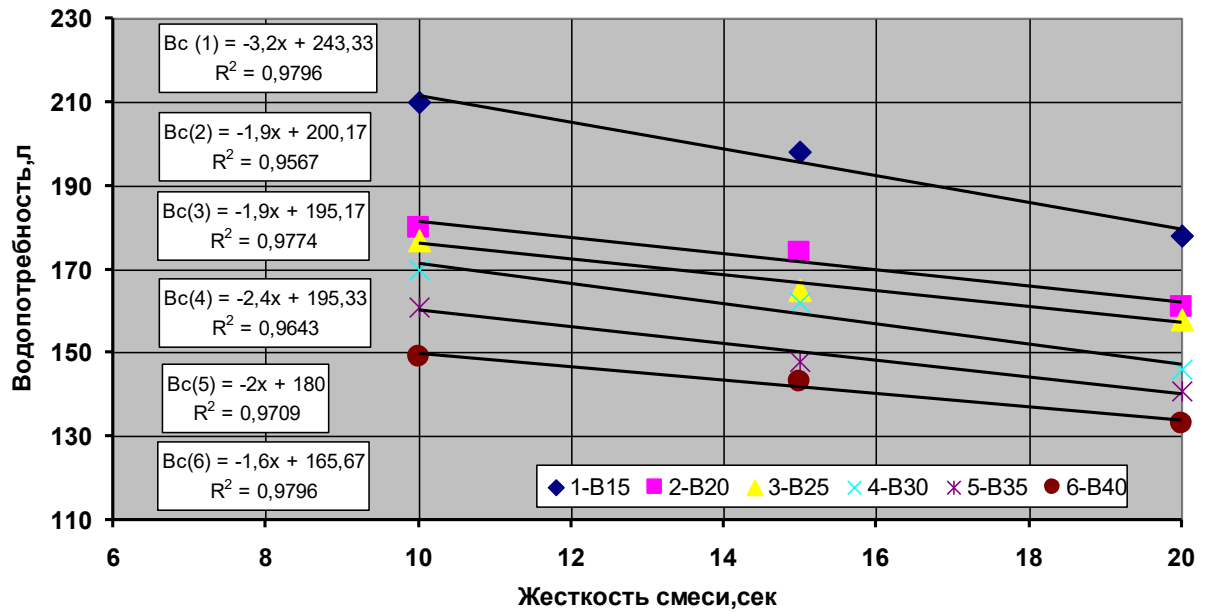
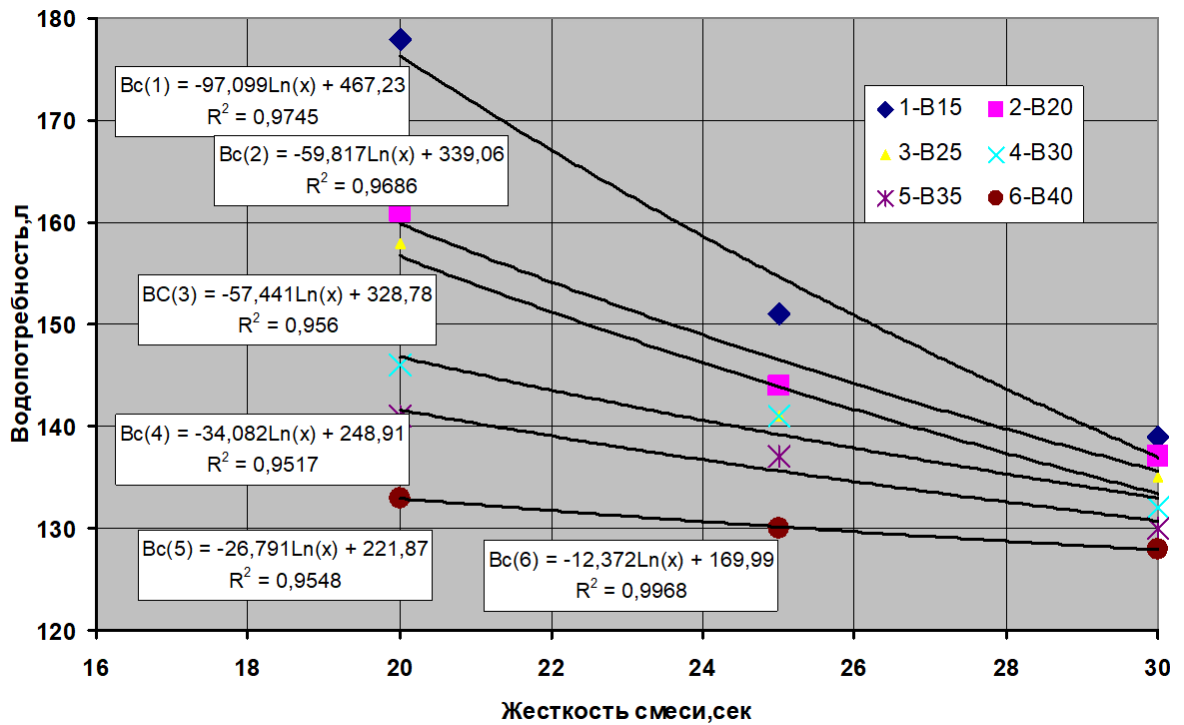


Рисунок 4.6 – Водопотребность бетонной смеси ($3с < Ж < 10с$)

Рисунок 4.7 – Водопо́требность бетонной смеси ($10с < Ж < 20с$)Рисунок 4.8 – Водопо́требность бетонной смеси ($20с < Ж < 30с$)

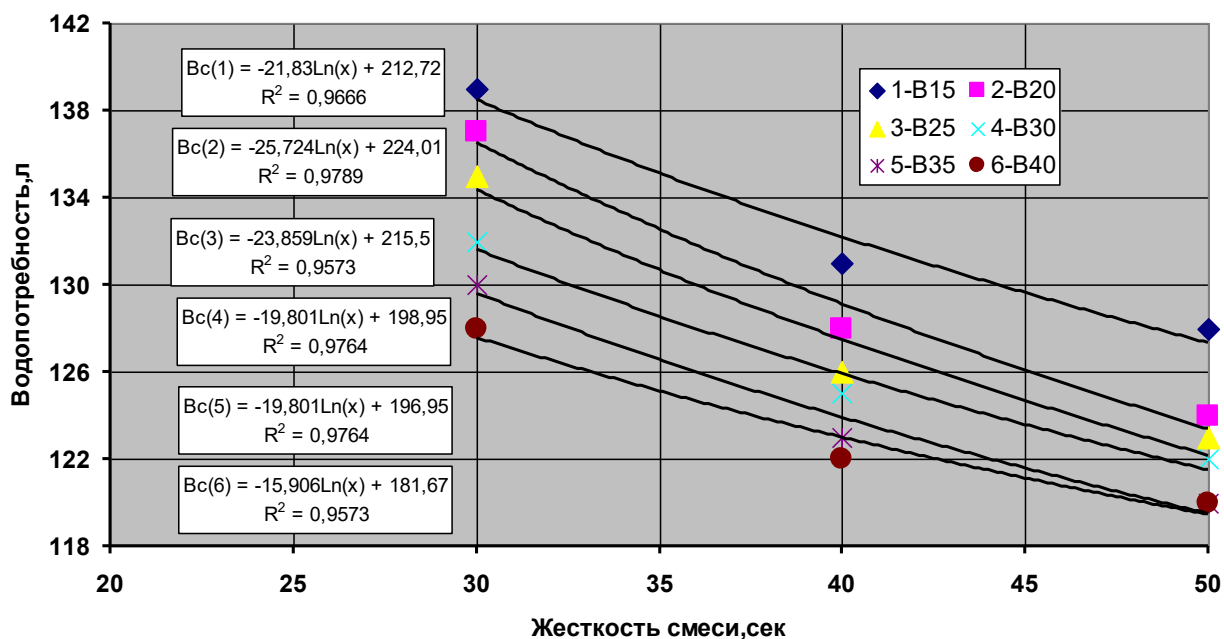


Рисунок 4.9 – Водопотребность бетонной смеси ($30с < Ж < 50с$)

Результаты математической обработки исследований для определения требуемой жесткости фибробетонной смеси, обеспечивающей равномерное перемешивание компонентов при различном объемном содержании фибры, приведены на рисунках 4.10 – 4.11.

Полученные зависимости жесткости смеси от объемного содержания фибровой арматуры для различного соотношения l/d , приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Зависимости жесткости смеси от объемного содержания фибровой арматуры для различного соотношения l/d

Жесткость матрицы 5 сек	Жесткость матрицы 10 сек	l/d
$Ж_{fb} = 2,8\mu_{fv} + 2,9$	$Ж_{fb} = 10\mu_{fv} + 0,67$	50
$Ж_{fb} = 1,76e^{1,56\mu_{fv}}$	$Ж_{fb} = 4,96e^{1,42\mu_{fv}}$	75
$Ж_{fb} = 2,33e^{2,06\mu_{fv}}$	$Ж_{fb} = 3,48e^{2,12\mu_{fv}}$	100
$Ж_{fb} = 2,38 e^{2,42\mu_{fv}}$	$Ж_{fb} = 3,34e^{2,42\mu_{fv}}$	125

Для контроля и корректировки подобранного состава СФШБ необходимо для выбранного соотношения компонентов произвести первый пробный контрольный замес, определить консистенцию и сформировать кубы. Если окажется, что консистенция не соответствует заданной, то состав корректируется.

Пусть, например, вместо требуемой жесткости получена величина $Ж'$.

Тогда требуемая водопотребность подсчитывается по формуле:

$$B = B + 3,5 \cdot (Ж' - Ж). \quad (4.20)$$

Выражение (4.20) получено на основании следующих рассуждений. Пусть при работе на определенных материалах имело место соотношение (3, а) в [21]. Если в силу каких-то причин при том же расходе воды жесткость стала $Ж' \neq Ж$, то окажется справедливой зависимость:

$$B = 260 - 3,5 \cdot Ж'. \quad (4.21)$$

Но чтобы на этих же материалах получить прежнюю жесткость $Ж$ необходимо иметь расход воды B' . Эти величины будут связаны выражением:

$$B' = 260 - 3,5Ж. \quad (4.22)$$

Переносим второе слагаемое в формулах (4.21) и (4.22) в левую часть. Сможем приравнять полученные выражения и, решая уравнение относительно B' , найдем (4.20). Получив уточненное водосодержание, по формулам [21] подсчитывают расход других компонентов.

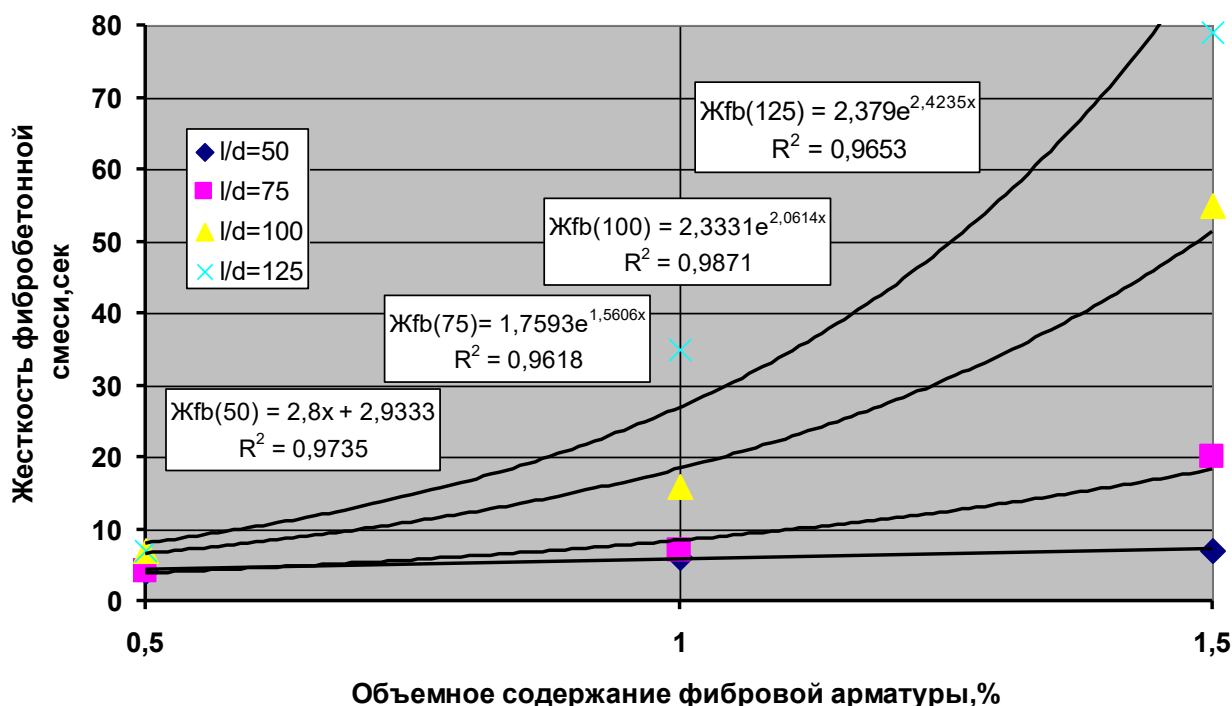


Рисунок 4.10 – Прогнозируемая жесткость фибробетонной смеси (при $Ж = 5$ сек)

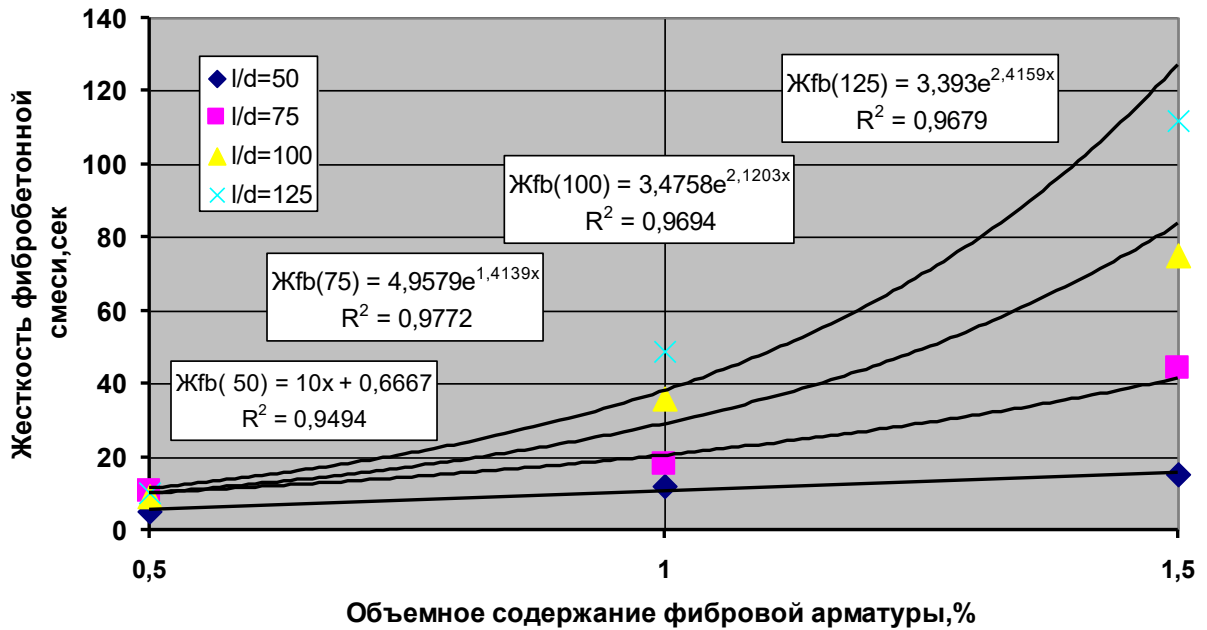


Рисунок 4.11 – Прогнозируемая жесткость фибробетонной смеси (при $Ж = 10$ сек)

Если при контрольных испытаниях окажется, что прочность не соответствует требуемой (разрешается лишь превышение до 15%), то (В/Ц) уточняют по формулам:

$$(B/L)' = \frac{0,85(B/L)}{(1-0,12(B/L))}; (R_{\sigma} > R_{\sigma}' \geq 0,85R_{\sigma}), \quad (4.23)$$

$$(B/L)' = \frac{1,15(B/L)}{(1+0,92(B/L))}; (R_{\sigma} < R_{\sigma}' \leq 1,15R_{\sigma}). \quad (4.24)$$

Выражение (4.23) получено на основании следующего рассуждения:

Пусть $\frac{R_{\sigma} - R_{\sigma}'}{R_{\sigma}} \cdot 100\% \leq 1,5\%$ (т.е. $R_{\sigma} > R_{\sigma}' \geq 0,85R_{\sigma}$),

Тогда:

$$R_{\sigma}' = R_u \left(\frac{A}{B/L} - 0,8A \right) = 0,85R_{\sigma}. \quad (4.25)$$

Отсюда:

$$R_{\sigma} = \frac{R_u}{0,85} \left(\frac{A}{B/L} - 0,8A \right). \quad (4.26)$$

Подставляя (26) в формулу (6) имеем

$$\left(\frac{B}{L} \right)' = (AR_u / (\frac{AR_u}{0,85(B/L)} - \frac{AR_u \cdot 0,8}{0,85} + 0,8AR_u)). \quad (4.27)$$

Упрощая выражение (4.27), получим формулу (4.23).

Аналогично рассуждая, при $R_{\sigma} < R_{\sigma}' \leq 1,15R_{\sigma}$, получаем формулу (4.24).

После этого, используя величину $(B/C)'$ по формулам (13, 14, 16, 19) в [21], подсчитывают требуемое количество цемента и заполнителей.

Корректировка при изменении качества компонентов.

1) Если изменилась влажность и зерновой состав заполнителей, то лаборатории, определяя состав бетона, находят оптимальное соотношение между сухими мелкими и крупными заполнителями, имеющими определенный гранулометрический состав. Однако на практике возможны случаи, когда предприятия стройиндустрии получают мелкие заполнители, в которых присутствуют непредусмотренные по крупности примеси, а также влага. Рассеивать заполнители и просушивать их в условиях производства нецелесообразно, а подбирать состав бетона опытным путем для каждой партии заполнителя и для каждого случая изменения влажности очень трудоемко, что задерживает использование доставленных на предприятие материалов.

Учитывая вышеизложенное, состав мелкозернистого сталефиброшлакобетона может быть подсчитан по формулам:

$$\Pi' = \frac{\Pi}{(1 - Y_{kn})(1 - W_n)}, \quad (4.28)$$

$$B' = B - W_n \cdot (\Pi'(1 + Y_{kn})), \quad (4.29)$$

где Π – масса чистого сухого шлакопемзового песка (на котором определяется состав бетона в лаборатории), кг;

Π' – масса шлакопемзового песка, гранулометрия которого отличается от принятой при назначении состава бетона, кг;

Y_{kn} – доля крупных частиц в песке;

W_n – доля влаги в песке;

B – масса воды (ее расход при сухих заполнителях), кг;

B' – необходимое количество воды, которое надо добавлять в смесь в производственных условиях, л.

При использовании сухого песка ($W_n = 0$) формулы (4.28), (4.29) существенно упрощаются.

При правильном проведении всех расчетов выполняется условие:

$$B + П = B' + П'. \quad (4.30)$$

2) Если изменилась нормальная густота вяжущего (вместо НГ стала НГ'), то при неизменной активности цемента (В/Ц) остается прежним, а расход воды подсчитывается по формуле:

$$B' = B \cdot \left(1 + \frac{НГ' - НГ}{(B/Ц)}\right). \quad (4.31)$$

Затем по формулам (13, 14, 16, 19) в [21] подсчитывается содержание остальных компонентов бетона.

В связи с тем, что как назначение, так и корректировка состава фибробетонов при изменении качества компонентов и смеси требуют значительного объема вычислений и эти операции приходится выполнять довольно часто, представилось возможным на основании вышеприведенных математических зависимостей составить программы для ЭВМ с целью освобождения сотрудников лабораторий от громоздкой счетной работы и приготовления пробных замесов, чтобы сосредоточить их внимание на контроле материалов.

Расчет состава СФШБ с минимальным расходом вяжущего. В вышеизложенном способе (как и во всех традиционных) сначала находится количество цементного теста, а затем в соответствии с ним дополняется объем бетона определенным количеством заполнителей.

Второй, более логичный, способ заключается в нахождении (В/Ц) и d_m , а затем подсчете минимально возможного расхода цемента и других его компонентов по следующим формулам:

$$Ц_{min} = \frac{1000(1 - d_m) - в}{B/Ц + 1/\rho_{ц} + D/Ц\rho_{ц}}, \quad (4.32)$$

где $в$ – допустимое воздуховодное содержание бетонной смеси;

D – масса тонкомолотой шлакопемзовой добавки.

Учитывая формулу (12) в [21] имеем

$$\Pi_{min} = \frac{1000(1 - d_m) - B}{B/\Pi + 2/\rho_{\Pi}}, \quad (4.33)$$

$$D = 0,91 \cdot \Pi_{min}, \quad (4.34)$$

$$B_{min} = \left(\frac{B}{\Pi} \right) \cdot \Pi_{min}, \quad (4.35)$$

$$\Pi = \frac{1000 \cdot d_m \cdot \rho_j}{1 + \tau_m}. \quad (4.36)$$

Далее необходимо определить консистенцию пробного замеса и по ней назначить способ и режим уплотнения изделий из полученной смеси.

В случае, когда смесь получается неудобоукладываемой для имеющихся условий уплотнения, необходимо по формулам, приведенным выше, скорректировать расход воды, по формуле (13) в [21] определить требуемое для обеспечения заданной прочности количество цемента и по формулам (16, 19) в [21] найти расход заполнителей.

4.3 Анализ результатов испытаний на сжатие и растяжение образцов из СФШБ

4.3.1 Результаты испытаний на сжатие

При работе бетона в условиях трехосного неравномерного сжатия вида $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$ его предел прочности можно представить двумя слагаемыми $\sigma_1 = \sigma_c + k \cdot \sigma_0$.

Первое слагаемое представляет собой прочность бетона при одноосном сжатии, а второе – избыточная прочность за счет бокового обжатия вследствие косвенного армирования (k – коэффициент эффективного бокового обжатия).

Таким образом, прочность на сжатие сталефибробетона на основе вышеизложенного, можно определить

$$R_{fb} = R_b + k \cdot \sigma_0, \quad (4.37)$$

где σ_0 – величина бокового обжатия бетона, определяемая по формулам (2.24) или (2.30) в зависимости от случая разрушения.

Используя ранее полученные значения коэффициента ориентации K_s и характеристики сцепления разных видов фибр с бетоном (η_f), полученные опытным путем, определим величину σ_0 :

- для бетонных образцов, в которых разрушение сопровождалось в основном выдергиванием всех фибр из бетона (серия П(г)Ф, ТФ), по формуле (2.24);
- для бетонных образцов, в которых разрушение сопровождалось выдергиванием части фибр из бетона и разрыва остальных в предельном состоянии (серии П(в)Ф, ЛФ, ДФ), по формуле (2.30).

Результаты опытов по определению бокового обжатия бетона приведены в таблице Ж.1 приложения Ж.

В нашем случае для определения прочности сталефиброшлакобетона при сжатии за прочность бетона при одноосном сжатии принимается призмная прочность бетона R_b .

Для определения прочности бетона при одноосном растяжении воспользуемся опытной зависимостью для мелкозернистого ШБ

$$R_{bt} = 0,2 \sqrt[3]{R_b^2}. \quad (4.38)$$

Тогда параметр хрупкости ω определится

$$\omega = \frac{R_b}{0,2 \sqrt[3]{R_b^2}} = 5 \sqrt[3]{R_b}. \quad (4.39)$$

Учитывая, что показатель класса материала $m=5$, получим для параметра формы предельной поверхности

$$\varphi = \frac{30 \sqrt[3]{R_b} - 10}{15 \sqrt[3]{R_b} + 5}. \quad (4.40)$$

При работе бетона в условиях трехосного неравномерного сжатия вида $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$ его предел прочности можно представить двумя слагаемыми

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \cdot \sigma_0. \quad (4.41)$$

Первое слагаемое представляет собой прочность бетона при одноосном сжатии, а второе – избыточная прочность за счет бокового обжатия вследствие косвенного армирования.

Коэффициент эффективности бокового обжатия определяется по формуле:

$$k = \varphi - \frac{R_b + R_b/\omega}{2\sigma_0} + \frac{C_1}{\sigma_0}. \quad (4.42)$$

Параметр формы предельной поверхности φ и параметр хрупкости бетона ω определяются соответственно по (4.41) и (4.42).

Коэффициент C_1 с учетом величины бокового обжатия бетона (2.24) или (2.30) определяется:

$$C_1 = \sqrt{(\varphi^2 + \varphi - 2) \cdot \sigma_0^2 + (2 + \varphi) \left(R_b - \frac{R_b}{\omega}\right) \cdot \sigma_0 + 0,25 \cdot \left(R_b + \frac{R_b}{\omega}\right)^2}. \quad (4.43)$$

Сравнение опытных и расчетных (4.38) значений призмной прочности СФШБ приведено в таблице Ж.2 приложения Ж.

4.3.2 Результаты испытаний на растяжение

На основании экспериментальных исследований получены формулы по определению прочности сталефибробетона при центральном растяжении:

- при выдергивании всех фибр

$$R_{fbt(1)} = \frac{K_t \mu_{fv} l_f R_b}{4\eta d_f} + R_b (0,06 - 4\eta K_t \mu_{fv}); \quad (4.44)$$

- при обрыве части фибр и выдергивании остальных

$$R_{fbt(2)} = K_t \mu_{fv} R_f \left(1 - \frac{l_{f,an}}{l_f}\right) + R_b (0,06 - 4\eta K_t \mu_{fv}). \quad (4.45)$$

где η – характеристика сцепления, значения которого принимаются в зависимости от вида поверхности фибр.

Коэффициент сцепления является переменной величиной в зависимости от действующего напряжения. Для практических расчетов можно принять следующие значения η :

- прямой – $\eta_{f,расч} = 2,3$;
- волнистой – $\eta_{f,расч} = 0,6$;

- из листа – $\eta_{f,расч} = 0,7$;
- из троса – $\eta_{f,расч} = 1,8$;
- фибры «Драмикс» – $\eta_{f,расч} = 0,9$.

Сравнительные результаты испытаний приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Характеристики образцов, испытанных на растяжение

Марка образца	Прочность матрицы при сжатии, R_b	μ_v	K_t	Прочность при центральном растяжении		
				опыт	расчет	
				R_{fbt}	$R_{fbt,(1)}$	$R_{fbt,(2)}$
	МПа			МПа	МПа	МПа
1	2	3	4	5	6	7
Фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки по ГОСТ 3282-744 ($d_f = 0,8$ мм, $l_f = 97$ мм, $R_{sf} = 700$ МПа)						
П(Г)Ф-1-0,8-0,5	29,5	0,0051	0,743	2,3	2,22	2,20
П(Г)Ф-2-0,8-1,0	31,4	0,01	0,743	2,9	2,83	2,74
П(Г)Ф-3-0,8-1,5	28,9	0,015	0,743	3,1	3,03	3,0
Фибра из проволоки волнистого очертания ($d_f = 0,63$ мм, $l_f = 70$ мм, $R_{sf} = 680$ МПа)						
П(В)Ф-1-0,63-0,5	29,5	0,0052	0,570	3,41	5,63	3,33
П(В)Ф-2-0,63-1,0	31,4	0,01	0,570	4,64	9,58	4,82
П(В)Ф-3-0,63-1,5	28,9	0,015	0,570	6,34	12,56	6,21
Фибра из листа прямоугольного сечения ($d_f = 0,49$ мм, $l_f = 44$ мм, $R_{sf} = 450$ МПа)						
ЛФ-1-0,49-0,5	29,5	0,0052	0,432	2,51	3,7	2,6
ЛФ-2-0,49-1,0	31,4	0,010	0,432	3,65	5,92	3,51
ЛФ-3-0,49-1,5	28,9	0,015	0,432	4,17	7,16	4,12
Фибра из троса волнистого очертания ($d_f = 1,0$ мм, $l_f = 80$ мм, $R_{sf} = 1200$ МПа)						
ТФ-1-1,0-0,5	29,5	0,0046	0,630	2,2	2,10	1,45

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7
ТФ-2-1,0-1,0	31,4	0,012	0,630	2,9	2,79	1,45
ТФ-3-1,0-1,5	28,9	0,015	0,630	2,95	2,81	0,50
Фибра рубленая из стальной проволоки (аналог фибры «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт») ($d_f = 0,75$ мм, $l_f = 60$ мм, $R_{sf} = 1100$ МПа)						
ДФ-1-0,75-0,5	29,5	0,005	0,513	3,16	3,18	3,13
ДФ-1-0,75-0,5	31,4	0,010	0,513	4,8	4,88	4,72
ДФ-1-0,75-0,5	28,9	0,015	0,513	5,95	5,92	5,81

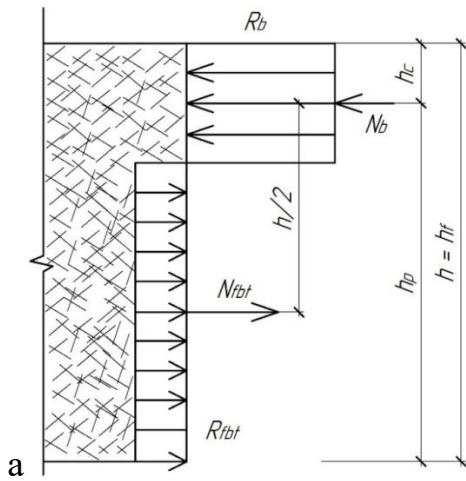
Сравнение опытных и расчетных значений, подсчитанных по формулам (4.44) и (4.45) приведены в таблице Ж.3 приложения Ж.

4.3.3 Прочность изгибаемого элемента при неравномерности распределения фибр по высоте сечения

Как отмечалось выше (п.3.8.2, глава 3) неравномерность распределения фибр по высоте сечения определяется значением коэффициента расслоения k_{st} .

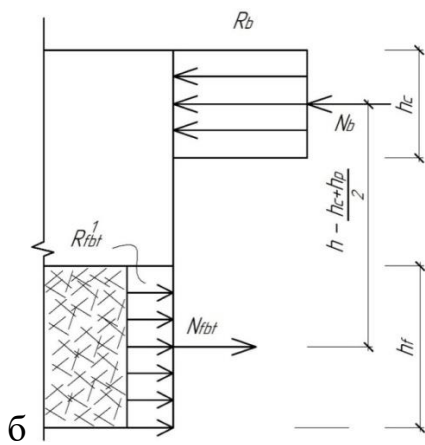
При исследовании работы фибр в трещине отмечается, что после образовании трещины она продолжает воспринимать усилия, ненамного отличающиеся от предельного. Следовательно, при изгибе в растянутой зоне сечения при линейном законе распределения деформации можно, с некоторым приближением, принять эпюру напряжений прямоугольной. Интенсивность ее при этом будет равно предельной прочности сталефибробетона при растяжении R_{fbt} .

Прочность сталефибробетона при сжатии не намного отличается от прочности бетона, следовательно, в сжатой зоне сечения можно, с некоторым приближением, принять напряжение равным призмочной прочности бетона R_b . Тогда распределение напряжений в сечении примет вид, показанный на рисунке 4.12, а.



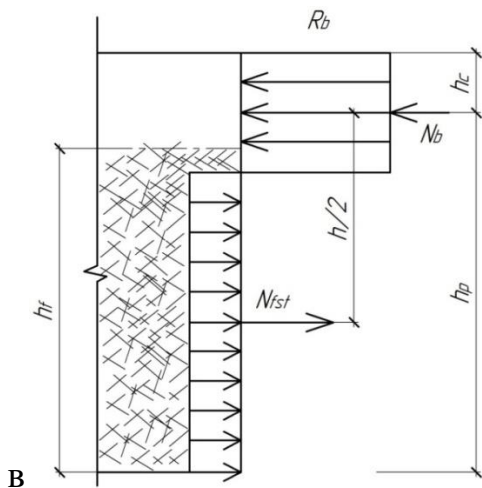
$$k_{st} = 1$$

$$M_{\text{раз}} = \frac{bh^2 R_b R_{fbt}}{2(R_b + R_{fbt})}$$



$$k_{st} > \frac{R_{fbt}^1 + R_b}{R_b}$$

$$M_{\text{раз}} = 0,5 \left(\frac{h}{k_{st}} \right)^2 b R_{fbt}^1 \left(2k_{st} - \frac{R_{fbt}^1}{R_b} - 1 \right)$$



$$k_{st} \leq \frac{R_{fbt}^1 + R_b}{R_b}$$

$$M_{\text{раз}} = \frac{bh^2 R_b R_{fbt}^1}{2(R_b + R_{fbt}^1)}$$

Рисунок 4.12 – Расчетные эпюры внутренних усилий:

а – $h_f = h$; б – $h_f < (h - x)$; в – $h_f \geq (h - x)$.

В случае коэффициента $k_{st} = 1$, прочность изгибаемого элемента прямоугольного сечения из условия равновесия сил и моментов определится по следующей формуле

$$M_{раз} = \frac{bh^2 R_b R_{fbt}}{2(R_b + R_{fbt})}, \quad (4.46)$$

где R_b – призмная прочность бетона, МПа;

R_{fbt} – прочность сталефибробетона растяжению, МПа;

b, h – размеры сечения, м.

При перераспределении фибр в образце в результате опускания их происходит увеличение коэффициента армирования в нижней его зоне и увеличение внутренней пары сил. При этом следует различать два случая при расчете на изгиб.

Первое: $h_f \geq (h - x)$, где x – высота сжатой зоны бетона, показанная на рисунке 4.12, в. Тогда расчет прочности производится по формуле (4.47), где вместо величины R_{fbt} должна быть R_{fbt}^1 (величина прочности сталефибробетона при растяжении с учетом перераспределения фибр).

$$M_{раз} = \frac{bh^2 R_b R_{fbt}^1}{2(R_b + R_{fbt}^1)}. \quad (4.47)$$

Второе: $h_f < (h - x)$, чему соответствует рисунок 4.12, б. Тогда расчет прочности при изгибе с учетом равновесия сил и моментов и в предположении, что эпюры усилий прямоугольны, производится по формуле

$$M_{раз} = 0,5 \left(\frac{h}{k_{st}} \right)^2 b R_{fbt}^1 \left(2k_{st} - \frac{R_{fbt}^1}{R_b} - 1 \right). \quad (4.48)$$

Границы применимости формул (4.46), (4.47) и (4.48) определим следующим образом.

Случай I. $h_f \geq (h - x)$, чему соответствует рисунок 4.12, в при равновесии сил

$$R_b b x = R_{fbt}^1 b (h - x). \quad (4.49)$$

Выразим x – высоту сжатой зоны сечения:

$$x = \frac{R_{fbt}^1 h}{(R_b + R_{fbt}^1)}. \quad (4.50)$$

При $h_f \geq (h - x)$ и $h_f = \frac{h}{k_t}$ получим

$$\frac{h}{k_t} \geq h - \frac{R_{fbt}^1 h}{R_b + R_{fbt}^1}. \quad (4.51)$$

Преобразуя (4.53) получим

$$k_{st} \leq \frac{R_b + R_{fbt}^1}{R_b}. \quad (4.52)$$

Случай II. $h_f < (h - x)$ (рисунок 4.12, б) при равновесии сил

$$R_b b x = R_{fbt}^1 b h_f. \quad (4.53)$$

Высота сжатой зоны

$$x = \frac{R_{fbt}^1 h_f}{R_b}. \quad (4.54)$$

При $h_f < (h - x)$ и $h_f = \frac{h}{k_{st}}$ получим

$$\frac{h}{k_{st}} < h - \frac{R_{fbt}^1 h}{R_b k_{st}}. \quad (4.55)$$

Окончательно

$$k_{st} > \frac{R_b + R_{fbt}^1}{R_b}. \quad (4.56)$$

Таким образом, при выполнении условия (4.52), чему соответствует рисунок 4.12, в расчет прочности при изгибе производится по формулам (4.46), при (4.48) чему соответствует рисунок 4.12, б – уравнение (4.55).

Расчетное сопротивление сталефибробетона растяжению при изгибе для прямоугольных сечений определялось из равенства внешних и внутренних усилий по формуле (4.46). Приравняв внутренний момент к внешнему, получаем экспериментальное сопротивление сталефибробетона растяжению при изгибе

$$R_{fbt} = \frac{1}{\left(\frac{bh_f^2}{2M_{\text{раз}}} - \frac{1}{R_b}\right)}, \quad (4.57)$$

при выполнении условия $h_f \geq (h - x)$.

$$R_{fbt}^1 = R_b \left(\frac{h}{h_f} - \frac{1}{2}\right) - \left[\left(R_b \left(\frac{h}{h_f} - \frac{1}{2}\right)\right)^2 - \frac{2M_{\text{раз}}R_b}{bh_f^2}\right]^{0.5}, \quad (4.58)$$

при выполнении условия $h_f < (h - x)$.

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработана методика расчета и подбора состава сталефиброшлакопемзобетона в зависимости от количества, геометрических размеров и форм стальных фибр, которые оказывают значительное влияние на свойства бетонной смеси и бетона, что значительно помогает упростить подбор состава и в дальнейшем может быть применены соответствующие корректировки для универсальности метода.

2. Выведена зависимость, позволяющая спрогнозировать расчетное время укладки фибробетона.

3. Определены зависимости водопотребности фибробетонной смеси для различных классов бетона.

4. Получены зависимости жесткости смеси в зависимости от объемного содержания фибровой арматуры для различных геометрических размеров.

5. По результатам методики подбора состава сталефиброшлакобетона зарегистрирована программа ЭВМ №2024662548 «Подбор состава сталефиброшлакобетона с заданными физико-механическими характеристиками».

6. Приведена методика корректировки состава СФБ при изменении качества компонентов.

Эффективность сталефибробетонных конструкций по снижению расходов на проектирование, изготовления, транспорт, возведение и эксплуатацию, на основе анализа литературных источников [2, 15, 20, 22, 24, 25, 30, 32, 71, 78] приведены на рисунке 5.1



На рисунке 5.2 приведена схема создания и практической реализации исследований материалов на основе сталефиброшлакобетона при разработке мероприятий по восстановлению и защите конструкций переходных плит,

выполненные сборно-монолитными из бетона класса В30, марки по водопроницаемости W6 с морозостойкостью, соответствующей району строительства [1].



Рисунок 5.2 – Структурная схема создания и реализации результатов исследований материалов на основе СФШБ

Характерные дефекты и повреждения в конструкциях мостовых сооружений (переходных плит), влияние на работу плит их гранулометрического состава, влажности грунта, оценка фактического состояния материалов эксплуатируемой конструкции и разработка мероприятия по восстановлению и защите конструкций

переходных плит из СФШБ в конструкции гибкой неразрезной переходной плиты изложены ранее в [7, 9, 12, 14, 73, 74, 92].

5.3 Технико-экономическое обоснование применения исследуемых материалов в конструкциях переходных плит

Оценка годовой экономической эффективности применения исследуемых материалов в конструкциях переходных плит проведена по методике, разработанной В.В. Патурьевым [56].

В соответствии с этой методикой экономическая эффективность применяемых решений оценивается по формуле:

$$\mathcal{E} = (C_0 + E_n \cdot K_c) - (C_n + E_n \cdot K_n), \quad (5.1)$$

где C_0 и C_n – годовые эксплуатационные расходы по традиционному и новому вариантам. В качестве традиционного применяется армирование плиты обычной стальной арматурой, как показано на рисунке 5.3, новый же вариант – это плита, изготовленная с применением сталешлакофибробетона;

K_n и K_c – капиталовложения по вариантам;

E_n – экономический эффект.

Примером традиционной конструкции переходной плиты является вариант, использованный нами при проектировании моста через реку Птань на км 0+700 автомобильной дороги Плахово – примыкание к автомобильной дороге Авдулово–Воскресенское в Данковском районе Липецкой области и включает в себя затраты на:

- приготовление бетонных смесей класса В30 (М400);
- перевозку бетонных смесей к месту производства работ;
- покупку и перевозку к месту производства работ арматурных стержней;
- установку закладных деталей и арматуры;
- укладку бетонной смеси на месте производства работ в опалубку.

Стоимость работ по устройству переходной плиты по этому варианту составляет 164,7 тыс.руб.

Стоимость работ по новому (разработанному) варианту с применением сталефиброшлакобетона – 185,5 тыс.руб.

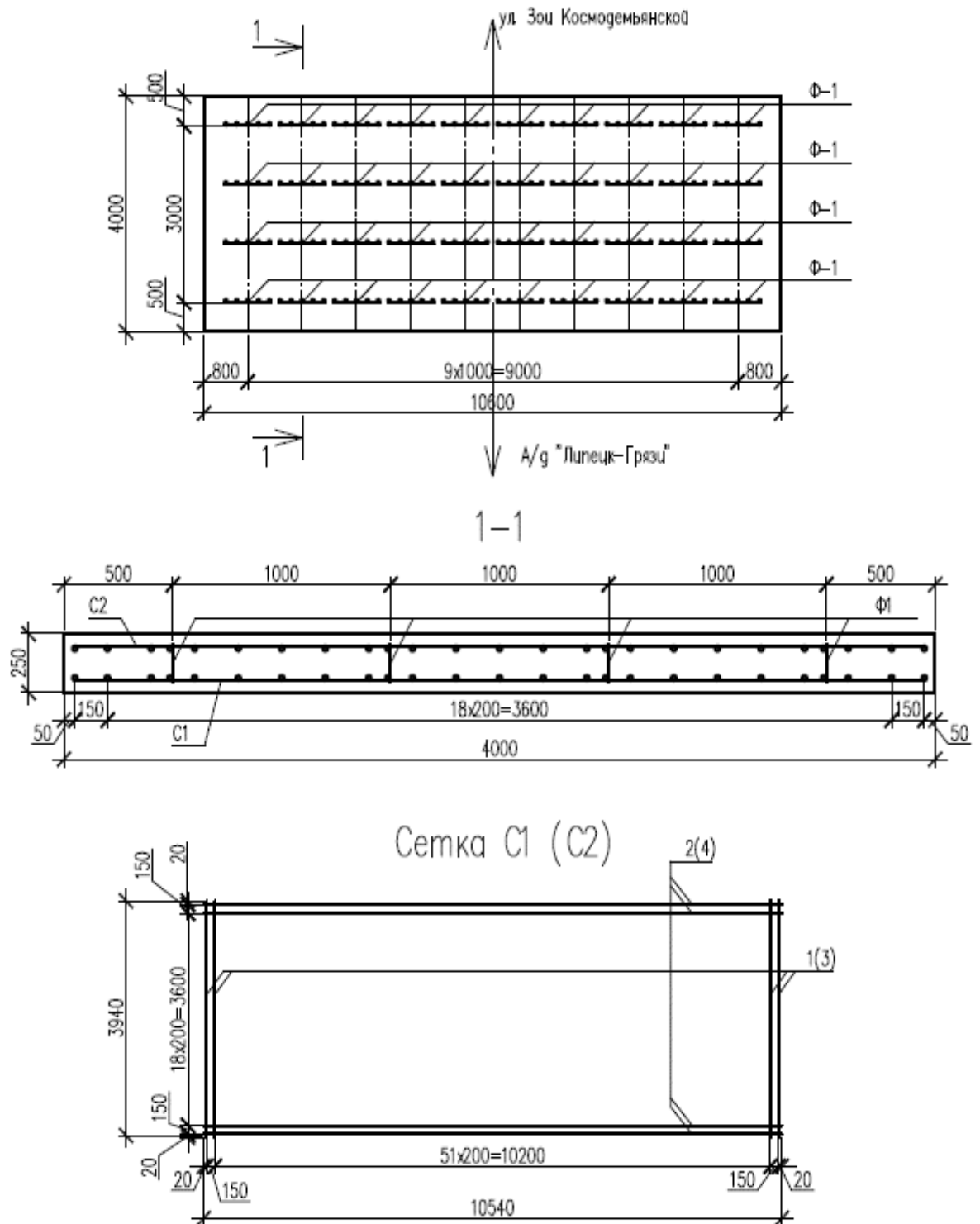


Рисунок 5.3 – Схема армирования переходной плиты по традиционной технологии

Долговечность конструкций из сталешлакофибробетона в 1,5 раза выше по сравнению с аналогами, выполненными с применением традиционного армирования. Тогда капитальные затраты по этому варианту составляют:

$$K_c = 164700 \times 1,5 = 247050 \text{ руб.}$$

Общие годовые эксплуатационные расходы определяют по формуле:

$$C_{\text{э.р.}} = C_{\text{ам}} + C_{\text{тр}} + C_{\text{ст}} + C_c, \quad (5.2)$$

где $C_{\text{ам}}$ – сумма амортизационных отчислений. При этом объем амортизационных отчислений:

$$C_{\text{ам}} = C_c (H_{\text{рем}} + H_{\text{кр}}) / 100, \quad (5.3)$$

где C_c – стоимость работ по устройству переходной плиты, руб.;

$H_{\text{рем}} = 10\%$ - норма отчислений на полное восстановление плиты.

Тогда по традиционному варианту:

$H_{\text{рем}} = 4\%$ - норма отчислений на капитальный ремонт.

$$C_c = 247050(10+4)/100 = 34587 \text{ руб.}$$

Годовой объем амортизационных отчислений:

$$C_{\text{ам}} = C_{\text{ор}} (H_{\text{рем}} + H_{\text{кр}}) / 100, \quad (5.4)$$

где $C_{\text{ор}}$ – сметная стоимость устройства переходных плит, руб.;

$H_{\text{рем}}$ – норма отчислений на полное восстановление конструкций, $H_{\text{рем}} = 10$;

$H_{\text{кр}}$ – норма отчислений на капитальный ремонт конструкции.

Годовой объем амортизационных отчислений при эксплуатации переходных плит по традиционной технологии (варианту) составляет:

$$C_{\text{ам}}^{\text{ст}} = 247050(10 + 4) = 34587 \text{ руб.}$$

По второму варианту:

$$C_{\text{ам}}^{\text{н}} = 185500(10 + 4) = 25970 \text{ руб.}$$

Годовой объем текущих расходов:

$$C_{\text{тр}} = K \cdot K_{\text{тр}} / 100, \quad (5.5)$$

где $K_{\text{тр}}$ – показатель годового объема текущих ремонтов. $K_{\text{тр}} = 2,3\%$.

Годовой объем текущих ремонтов при эксплуатации новых конструкций плит:

$$C_{mp}^H = 185500 \cdot \frac{2,3}{100} = 4266,5 \text{ руб.}$$

Годовой объем амортизационных отчислений при эксплуатации плит, выполненных по традиционной технологии:

$$C_{mp}^C = 247050 \cdot \frac{2,3}{100} = 5682,2 \text{ руб.}$$

Общий объем годовых эксплуатационных расходов составляет:

$$C_0 = 34587 + 5682,2 = 40269,2 \text{ руб.}$$

$$C_H = 25970 + 4266,5 = 30236,5 \text{ руб.}$$

Годовая экономическая эффективность от внедрения новых конструкций составляет:

$$\begin{aligned} \Xi &= (40269,2 + (0,15 \cdot 247050)) - (30236,5 + (0,15 \cdot 185500)) = 77326,7 - \\ &58061,5 = 19265,2 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Таким образом, замена переходных плит, выполненных по традиционной технологии и с типовым армированием на плиту из сталешлакофибробетона дает экономический эффект в размере 19,3 т. руб. на 1 м².

5.4 Проектирование оптимальных вариантов аэродромных покрытий

В настоящее время увеличивается применение сборных аэродромных покрытий. Однако анализ затрат показывает, что значительная часть средств (до 40%) расходуется на осуществление предварительного напряжения арматуры. Упрощение или замена этих мер, обеспечивающих трещиностойкость плит, должны привести к общему удешевлению строительства аэродромных покрытий.

Частной мерой, заменяющей предварительное напряжение, может служить фибровое армирование бетона.

Два основных варианта конструкции плит:

1. а с обычным армированием (используется высокопрочная сталь А-IV и зонным дисперсным армированием, показанная на рисунке 5.4. Роль дисперсной

арматуры в этом случае – сдерживать развитие трещин при высоких напряжениях в стержневой арматуре.

2. Плита с зоной дисперсного армирования, играющей роль силового элемента. Исходя из картины напряжений в изгибаемом элементе и эксплуатационных требований, конструкция плит принята трехслойной, показанная на рисунке 5.5.

Кроме указанных, рассматривался также вариант усиления существующих конструкций преднапряженных сборных плит посредством зонного дисперсного армирования. Получен результат, свидетельствующий о возможности перевода аэродромных плит второй категории нагрузки в первую. Однако стоимость такого варианта несколько выше, чем у первых двух. В качестве варианта – аналога используется аэродромное покрытие, выполненное из сборных преднапряженных плит.

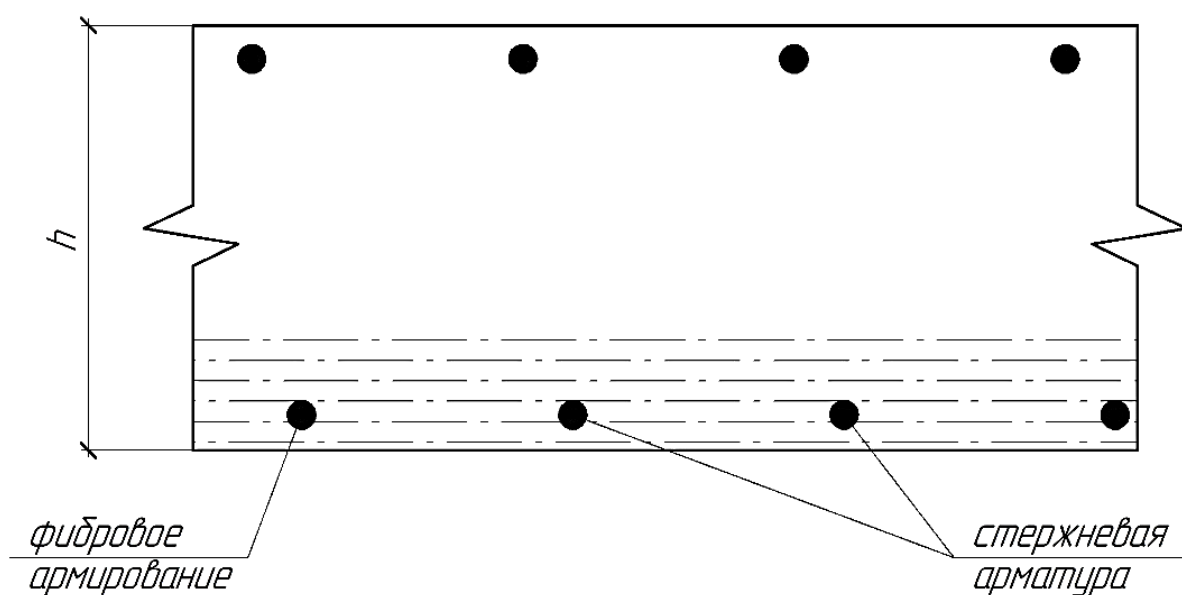


Рисунок 5.4 – Проектируемое аэродромное покрытие (I вариант)

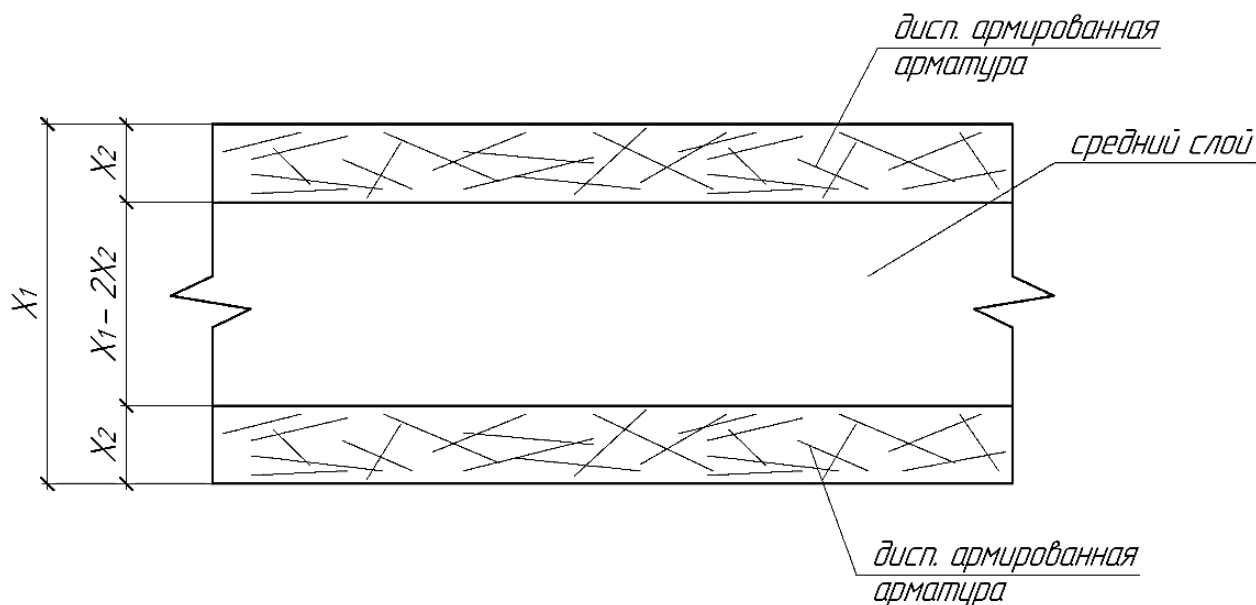


Рисунок 5.5 – Проектируемое аэродромное покрытие (II вариант)

При рассмотрении первого варианта следует отметить, что процент зонного армирования принимали равным 1 – 1,5%, что позволяет почти вдвое повысить напряжения в рабочей арматуре при сохранении нормируемой ширины раскрытия трещин, равной 0,3 мм. Применение высокопрочной стали позволило уменьшать расход материалов и тем самым удешевить конструкцию. Обеспечивается примерно двадцати-процентная экономия средств.

Второй вариант требует другого подхода, поскольку дисперсная арматура является силовым элементом и ее объем должен быть более значительным.

Принимая форму эпюры напряжений, возникающих при изгибе, с учетом повышенного сопротивления армированной зоны, приходим к выражению для изгибающего момента:

$$M = 0,5x_3 \left[\frac{\frac{E_1}{E_2} x_2 (2z - x_2)^2 + 1,334(z - x_2)^3}{x_1 - z} + (x_1 - z - x_2)^2 \right] + R_{2p} x_2 \left(x_1 - z - \frac{x_2}{2} \right). \quad (5.6)$$

Положение нейтральной оси определяется из уравнения:

$$z = \frac{-(2nx_2 + 2kx_1 - kx_2) - \sqrt{(2nx_2 + 2kx_1 - 3x_2 - kx_2)^2 - 4(1-k)[x_2^2(1-n) - x_1x_2(k+1) - kx_1^2]}}{2(1-k)} \quad (5.7)$$

Задача заключается в минимизации функции стоимости, учитывающей стоимость материалов. Вид функции определяется выражением

$$C = \sum_{i=1}^m C_i \vartheta_i. \quad (5.8)$$

где C_i – стоимость материалов, руб.;

ϑ_i – расход материалов.

Функция стоимости арматуры учитывает затраты на ее резку. Стоимость бетона аппроксимируется как функция марки бетона на растяжение по данным, приведенным в справочной литературе.

Поиск оптимума осуществлен методом Бокса. В качестве девяти независимых переменных приняты:

x_1 – высота/ толщина/ плиты;

x_2 – толщины армированной зоны;

x_3 – марка бетона на растяжение;

x_4 – процент армированной зоны;

x_8 – диаметр армирующих волокон зоны;

x_5 – длина волокон армированной зоны;

x_7 – процент армирования среднего звена;

x_9 – диаметр волокон среднего звена;

x_6 – длина волокон среднего слоя.

Поиск минимума осуществлялся в области, ограниченной условиями прочности и конструктивными требованиями, связанными с технологией изготовления.

Если ограничить диаметр армирования величиной $x_{8,9} = 0,6$ мм, стоимость варианта составит около 9,8 руб/м², то есть будет близкой к варианту – аналогу.

Полученные результаты дают основание и для проектирования опытных образцов. Экспериментальная апробация покрытий исследуемых конструкций, в свою очередь, позволит уточнить исходные положения и рассмотреть задачу оптимизации для массовых конструкций исследуемого типа, но эта задача моих дальнейших исследований.

5.5 Рекомендации по изготовлению сталефиброшлакобетонных изделий

Технология изготовления изделий и элементов конструкций из сталефибробетонов на основе отходов местных производств нового поколения, обладающих повышенными прочностными и деформативными характеристиками представляется традиционной, однако имеет свои отличия в зависимости от вида продукции.

Главные конструктивные и технологические требования заключаются в том, что для производства сталефибробетонов на основе отходов местных производств необходимо обеспечить плавную равномерную подачу фибры на вибрационный или ленточный дозатор, транспортирующий ее непосредственно в бетоносмеситель.

На рисунке 5.6 показано оборудование со спиральным вибротранспортером-питателем, обеспечивающее разрыхление и плавную равномерную подачу фибры на вибрационный или ленточный дозатор, транспортирующий ее непосредственно в бетоносмеситель.

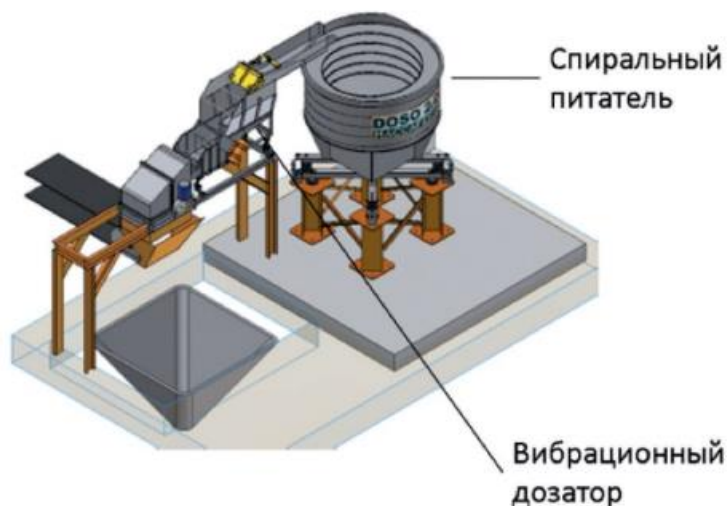


Рисунок 5.6 – Устройство для производства уплотненного состава сталефиброшлакобетона.

5.6 Особенности технологии сталефибробетона, учитываемые при проектировании СФБК

Нельзя запроектировать практически осуществимую, тем более отвечающую требованию минимальных затрат, конструкцию без учета технологических особенностей используемого материала и имеющихся в распоряжении средств для реализации принимаемого конструктивного решения. Это относится к конструкциям из любых материалов, а к сталефибробетонным в особенности, поскольку в процессе изготовления в незатвердевшем состоянии сталефибробетон представляет собой взвесь стальных стерженьков-фибр в бетоне, физические свойства фибр и бетона различны, а свойства комплекса находятся в существенной зависимости от их взаимовлияния и от влияния технологических воздействий. В первую очередь это относится к распределению и ориентации фибр в конструкции, являющихся, как было показано выше, важнейшими характеристиками, определяющими прочность и другие свойства СФБК.

Рассматриваемое направление применения железобетонных конструкций находится еще в начале пути своего развития, поэтому пока используется лишь простейший способ изготовления, называемый методом перемешивания, не позволяющий во многих случаях реализовать в полной мере возможности по рационализации технологии и конструктивных форм, открывающихся при прерывистом армировании бетона.

В числе просматривающихся перспектив развития этого направления можно назвать, например, электромагнитную ориентацию фибр, которая позволит ориентировать арматуру в строгом соответствии с направлениями возникающих в сечениях конструкции усилий; зонную укладку фибр и бетона в соответствии с величинами усилий, возникающих в различных сечениях конструктивных элементов; мероприятия по увеличению сцепления фибр с бетоном путей увеличения как анкерующей способности бетона, так и за счет применения эффективного профиля поверхности фибр; другие мероприятия, отвечающие реализации преимуществ принципа прерывистого армирования. Однако на сегодня

достаточно обоснованные и проверенные рекомендации могут быть даны только применительно к методу перемешивания.

Сущность метода перемешивания заключается в том, что в работающий смеситель с готовым бетоном засыпается фибровая арматура. Полученная таким образом смесь бетона с фибрами укладывается в опалубку (форму) и уплотняется.

На каждом из этапов изготовления конструкций из СФШБ (приготовление смеси, укладка, уплотнение) проявляются особенности, отличающие свойства смеси с фибрами, от мелкозернистого шлакобетона без фибр.

Основной задачей приготовления смеси бетона с фибрами является получение смесей с достаточно равномерным распределением фибр в бетоне. Этому может препятствовать образование в смеси комков фибр – «ежей» (флоккул).

В зависимости от относительной длины фибр l/d они могут быть в трех состояниях: сыпучем, связносыпучем, связном.

Первое состояние характерно для коротких фибр $l/d < 50$. При приготовлении смеси бетона с такими фибрами не возникает особых затруднений. Они могут засыпаться в работающий или неподвижный смеситель сразу, порцией на замес. Последовательность введения компонентов смеси (цемента, заполнителя, воды, фибр) в этом случае значения не имеет.

Второе состояние характерно для фибр с относительной длиной $l/d = 80-150$. Масса фибр сцепляется в комки. Если загрузить такие фибры в работающий и, тем более, неподвижный смеситель сразу порцией на весь замес, то комки фибр при перемешивании, пропитываясь цементным раствором, формируются в устойчивые шарообразные образования различных размеров («ежи»).

Характерное для фибр второго состояния свойство – при встряхивании комки сцепившихся фибр постепенно рассыпаются – позволяет получать однородные смеси при использовании следующего приема. Фибры засыпаются постепенно в работающий смеситель с заранее приготовленным бетоном. Раздельно попадая в бетон, они отделяются друг от друга, что предотвращает образование «ежей». Для

осуществления принципа постепенности введения фибр используются различные приспособления. Например, при ручном приготовлении смеси часто применяют сетчатые корзины, при полумеханизированном – вращающиеся барабаны типа «беличье колесо». Стенки барабанов имеют отверстия размером 1-2 длины фибр или щели длиной не имеет 10 длин фибр при ширине 0,2 – 0,8 длин фибр. Дозирование фибр осуществляется за счет того, что барабан загружается их навеской на один замес или 0,5 замеса.

При больших объемах изготовления конструкций из СФШБ наиболее целесообразным, хотя и несколько более сложным для реализации, нужно признать введение фибр в смеситель, совмещенное с их изготовлением («рубка фибр в смеситель»). Это может быть осуществлено при использовании станка для заготовки фибр, имеющего большую производительность, соответствующую производительности используемого смесителя. Например, для смесителя с объемом замеса $0,5 \text{ м}^3$ и циклом работы 5 мин, производительность станка должна быть около 10 кг фибр в минуту, что при фибрах диаметром 0,7 мм длиной 70 мм соответствует 47,5 тыс.шт/мин. (около 80 шт/с). Схемы блокировки станка со смесителем могут быть различными. Например, при введении фибр в смеситель самотеком по фибропроводу станок устанавливается над смесителем, в частности, в дозаторном отделении БСУ. Возможна рубка фибр на транспортер и др. Дозировка фибр при этом способе может осуществляться не только по массе, но и по времени.

Третье состояние массы фибр, характеризующееся высокой степенью их связности, проявляется при значениях $l/d > 200$. Приемы, используемые для фибр второго состояния (сетчатые корзины, вращающиеся барабаны) здесь не эффективны. Приемлемой в этом случае остается лишь описанная схема «рубки фибр в смеситель».

Вторая из упомянутых причин комкования фибр – перенасыщение ими смеси – становится понятной при рассмотрении вопроса о средней плотности фибр.

Максимальные коэффициенты армирования. Если емкость без бетона наполнить хаотично ориентированными фибрами и взвесить, то оказывается, что независимо от абсолютных значений длин и диаметров использовавшихся фибр, их вес в приятном объеме будет равен приблизительно

$$p = \frac{4,5\gamma V d}{l}, \quad (5.9)$$

где γ – средняя плотность (объемная масса) стали в плотном теле, т.е. 7,8 кг/дм³;

V – объем взятой емкости в литрах;

d – диаметр и длина фибр.

Эта формула может быть использована для определения необходимого объема емкостей для транспортирования или складирования фибр, определения размера барабанов-рассеивателей и т.п. Из этой же формулы можно определить предельное значение объемного коэффициента армирования хаотично ориентированных фибр.

$$\mu_{\text{насп. max}} = 4,5 \frac{d}{l}. \quad (5.10)$$

Как показали исследования, условием свободного взаимного перемещения фибр в процессе перемешивания бетона с фибрами является значение объемного фибрового армирования, не превышающее,

$$\mu_{\text{пер. max}} \approx 2,5 \frac{d}{l}, \quad (5.11)$$

в противном случае распределение фибр в смеси оказывается неравномерным.

Крупность заполнителя. С предельным насыщением бетона фибрами связаны также ограничения по крупности заполнителя используемого бетона. Для выявления этой связи рассматривается ячейка «В» скелета, образуемого фибрами в массе бетона. При равномерном распределении фибр и их равновероятной ориентации средний размер ячейки

$$B \approx \frac{d}{\sqrt{\mu}} \quad (5.12)$$

При среднем размере частиц заполнителя, не превышающем «В», они размещаются внутри ячеек, образованных фибрами, не препятствуя свободе перемещения и распределения фибр. Если средний размер частиц больше «В», они уменьшают объем, в котором размещаются фибры, что равносильно увеличению объемного коэффициента фибрового армирования. Таким образом, вторым условием не перенасыщения смеси фибрами будет

$$\mu_{Bmax} \leq \frac{d^2}{B^2}. \quad (5.13)$$

При коэффициенте объемного армирования, превышающем μ_{Bmax} , фибры раздвигаются частицами заполнителя, получаются неуплотняемые смеси, аналогичные крупнопористым бетонам.

Возможность обнажения фибр. Еще один фактор, учитываемый при проектировании состава смеси бетона с фибрами, связан с возможностью проявлению дефекта, заключающегося в обнажении фибр на открытой при формировании изделия поверхности.

При составах смесей, обеспечивающих свободу перемещения фибр в бетоне, они занимают у поверхности при виброуплотнении более устойчивое для них горизонтальное положение и, как правило, не выступают за открытую плоскость изделия. Однако, при определенных условиях на стадиях уплотнения смеси возникают препятствия свободе их перемещения. Например, в смесях с коэффициентом армирования близким к $\mu_{max\text{ пер}}$, укладываемых в тонкие стенки, происходит переориентация фибр. Значение коэффициента K_g изменяется с 0,5 для трехосной ориентации до 0,638 – для плоскостной. Соответственно увеличивается сверх предельного и значения коэффициента армирования в сечениях. Это приводит к стеснению свободы перемещения фибр, и они могут выступать из бетона наружу. При недопустимости этого необходимо снизить коэффициент армирования смеси на величину, равную отношению $K_{g\text{ изд.}}/0,5$.

5.7 Роторно-ударная технология изготовления фибробетонных элементов

Жесткую фибробетонную смесь можно рассматривать как трехкомпонентный материал, состоящий из твердых частиц (песка, цемента), стальных волокон и воздуха.

Воздушная фаза составляет в рыхлой смеси до 40% объема, в уплотненной 2-5 %. Задачей формования является удаление воздушной фазы, переукладка частиц заполнителя и фиксации распределения волокон по объему изделия, которое достигнуто при перемешивании.

При разработке технологической оснастки были приняты следующие условия:

1. Оборудование должно создавать оптимальные условия выхода (фильтрации) воздушной фазы из формуемого объема.
2. Характер приложения внешней нагрузки должен быть таков, чтобы не происходило перераспределения волокон по объему изделия.
3. Оборудование должно иметь низкий уровень шума и вибрации рабочих мест.

Изученные в этой области исследования показали, что частично этим условиям отвечает ударная технология формования, позволяющая получить изделия с высококачественной гладкой или рельефной поверхностью, без пор и раковин, с высокими показателями прочности бетона при экономии цемента до 20%.

При ударном воздействии на смесь процессы уплотнения и тиксотропного разжижения происходят последовательно (при вибрационном воздействии – одновременно). Это позволяет фиксировать армирующие волокна в изделии.

Для уплотнения фибробетонной смеси необходим подвод некоторого количества энергии. Рассмотрение работы известных механизмов (шок – столы и т.д.) приводит к выводу, что передача энергии проходит следующим образом:

$$\mathcal{E} \rightarrow \text{ВД} \rightarrow \Pi \rightarrow \Phi \rightarrow \text{БС}, \quad (5.14)$$

где $\mathcal{E}$ – электрическая энергия;

ВД – вращательное движение;

Π – преобразование вращательного движения в возвратно-поступательное;

Φ – форма;

БС – бетонная смесь.

Нетрудно заметить, что схема характеризуется значительной протяженностью, следовательно, ее реализация связана с большими потерями энергии и низкой надежностью.

Поэтому предложена следующая схема:

$$\mathcal{E} \rightarrow \text{ВД} \rightarrow \text{БС}, \quad (5.15)$$

Реализуя указанную схему (5.15) и учитывая современные тенденции в технологии строительства транспортных сооружений, предлагается роторно-ударная технология формирования жестких фибробетонных смесей.

Использование этого принципа позволяет создать широкую гамму технологического оборудования для поверхностно-ударного уплотнения и прессования смеси. Подобное оборудование используется для формования сферических цилиндрических и других поверхностей.

На рисунке 5.7 приведена принципиальная схема оснастки для изготовления фибробетонных плит.

Оснастка состоит из портала 1 с расходным бункером 2 и роторно-ударным механизмом 3, представляющим плоскими пружинами 5, имеющими грузы 6. На поверхности ротора имеются пазы для утапливания грузов. Ротор приводится во вращение от электродвигателя и имеет механизм регулировки положения на высоте 8.

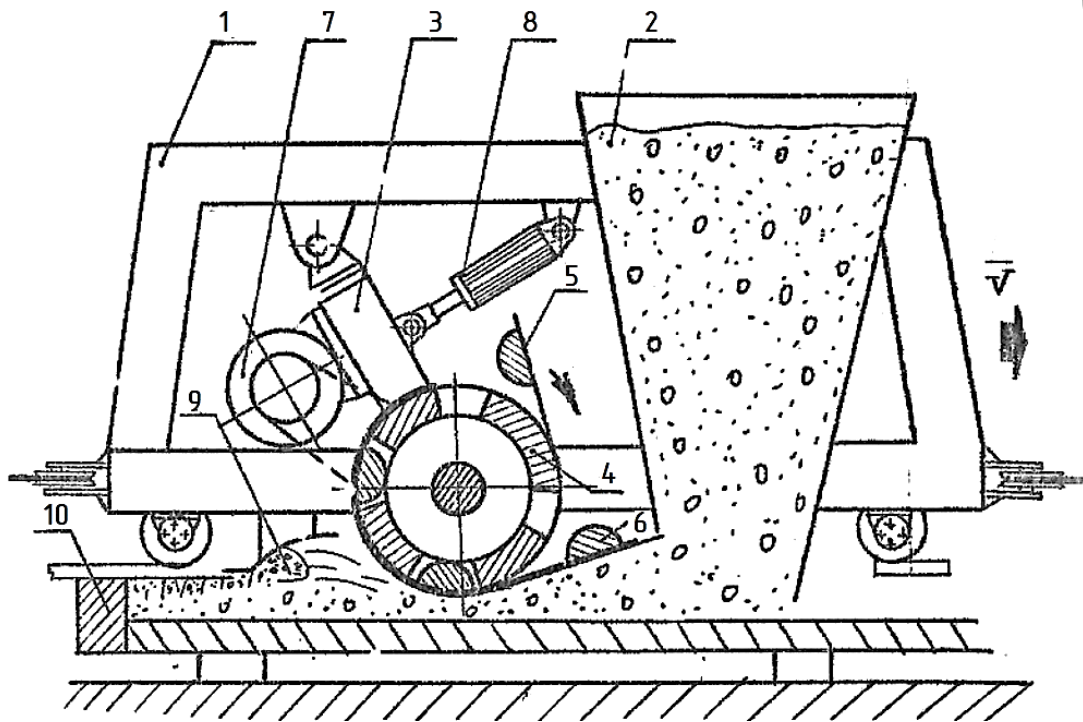


Рисунок 5.7 – Формование фибробетонной плиты с использованием роторно-ударной технологии: 1 – портал, 2 – бункер, 3 – роторно-ударный механизм, 4 – ротор, 5 – плоская пружина, 6 – груз, 7 – привод ротора, 8 – пневмоцилиндр, 9 – копильник, 10 – форма

Бетонная смесь из бункера распределяется по форме 10 и попадает в зону действия роторно-ударного механизма. При ударе пластины с грузом, на поверхности смеси возникают значительные контактные давления, которые определяются массой груза, скоростью вращения ротора, жесткостью пружины и механическими свойствами конкретной смеси. Волна сжатия распространяется по толщине формируемого слоя, затем отражается от формы, от поверхности и т.д. Частицы смеси получают перемещения, способствующие их компактной укладке. Воздух, находящийся между ними, сжимается и по сообщающимся каналам фильтруется через слой смеси.

Время истечения воздушной фазы из уплотняемого объема определяет время уплотнения. Скорость деформации в этом случае соответствует динамическому (ударному) уплотнению. При ударе пружины деформируется и под действием реакции смеси прижимается к цилиндрической поверхности ротора, где груз

фиксируется в данном положении (механическая защелка). В этом режиме происходит статическое обжатие смеси. Поскольку направление вращения ротора и направление перемещения совпадают, то под действием фрикционных сил мелкие частицы (песок, цемент), обладающие значительным (по сравнению с фибрами) коэффициентом трения, выносятся из зоны высокого в зону более низкого давления, т.е. в направлении вращения ротора. Мелкозернистый бетон попадает в копильник 9, где, находясь в состоянии тиксотропного разжижения, распределяется по поверхности изделия, создавая защитный слой. Варьирование параметрами оснастки (масса грузов, скорость вращения и т.д.) позволяет формировать смеси различной жесткости (80-200 сек) и толщины (10-200 мм).

5.8 Выводы по главе 5

1. Апробация укладки конструкции переходной плиты осуществлялась при проектировании моста через реку Птань на км 0+700 автомобильной дороги Плахово – примыкание к автомобильной дороге Авдулово – Воскресенское в Данковском районе Липецкой области.
2. Предложены альтернативные элементы конструкций покрытий жестких дорожных одежд и произведен их расчет с применением исследуемых материалов.
3. Для масштабного внедрения результатов работы разработаны нормативный документ «Технологический регламент по технологии производства сталефиброшлакобетона и конструкций из него».
4. Разработана схема создания и практической реализации результатов исследований материалов на основе СФШБ.
5. Экономический эффект от применения СФБК взамен традиционных составил 193 т. руб. на 1 м².
6. Предложены рекомендации по изготовлению транспортных конструкций из сталефибробетона на основе отходов местных производств.
7. Предложены два варианта конструкций аэродромных плит из СФШБ.

8. Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги»; магистров направления 08.04.01 – «Строительные технологии с использованием эффективных материалов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Получены экспериментальные зависимости характеристик шлакобетонной матрицы от крупности шлакового песка и содержания фракции менее 0,14 мм, позволяющие осуществить выбор оптимальной гранулометрии мелкого заполнителя.

Экспериментально доказана и теоретически обоснована эффективность использования сталефибробетона на основе отходов местных производств для транспортных сооружений - переходных плит и элементов мостов.

Выведены зависимости позволяющие контролировать соотношения фибровых волокон и заполнителя, для обеспечения необходимой подвижности и удобоукладываемости сталефибробетонной смеси.

Впервые определены физико-механические характеристики сталефибробетона, включая показатели деформативности.

Исследована совместная работа строительных материалов с разными свойствами и системная взаимосвязь между всеми компонентами слоистых, композитных и специальных строительных конструкций с учетом специфических требований.

На основании экспериментальных исследований были получены следующие охранные документы:

- патент на изобретение RU 2547348 C1 «Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона в условиях циклических нагрузений»;
- патент на изобретение RU 2545781 C1 «Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона».
- свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2024662548 Подбор состава сталефиброшлакобетона с заданными физико-механическими характеристиками.

Для масштабного внедрения результатов работы разработан нормативный документ «Технологический регламент по технологии производства сталефиброшлакобетона и конструкций из него».

Разработана схема создания и практической реализации результатов исследований материалов на основе СФШБ.

Разработаны рекомендации по определению оптимального зернового состава песков из отсева дробления литого шлакового щебня, позволяющие осуществлять корректировку составов с учетом возможностей принятого вида дробильного оборудования, которые стали основой для разработки программа для ЭВМ «Подбор состава сталефиброшлакобетона с заданными физико-механическими характеристиками» № 2024662548.

Предложены альтернативные элементы конструкций покрытий жестких дорожных одежд и произведен их расчет с применением исследуемых материалов.

Полученные результаты могут быть **рекомендованы** для использования: в производстве – при утилизации шлаковых отвалов, а также на дорожно-строительных предприятиях для строительства, ремонта и реконструкции автомобильных дорог; в учебном процессе – при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований. Целесообразно рассматривать полученные результаты для проектирования опытных образцов аэродромных покрытий, что позволит уточнить исходные положения и рассмотреть задачу оптимизации для массовых конструкций исследуемого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акчурин, Т. К. Переходные плиты из сталешлакофибробетона в конструкциях мостовых сооружений [Текст] / Т. К. Акчурин, А. Б. Бондарев, В. А. Стурова, А. С. Колобанов, В. К. Жидков, О. В. Бурлаченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2024. - № 2 (95). - С. 99-108.
2. Алфимова, Н. И. Перспективы повышения эффективности фибробетонов за счет применения композиционных вяжущих на основе техногенного сырья [Текст] / Н. И. Алфимова // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. международная научно-техническая конференция. – 2015. – С. 184-188.
3. Баженов, Ю. М. Технология бетона: учебник для вузов / Ю. М. Баженов. – М.: АСВ, 2002. – 500 с.
4. Бондарев, Б. А. Анализ дефектов и повреждений материалов в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог промышленных предприятий и способы их устранения [Текст] / Б. А. Бондарев, А. Б. Бондарев, П. В. Борков, [и др.] // Строительные материалы. – 2023. – № 6. – С. 70-74.
5. Бондарев, Б. А. Исследование деформативных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. - 2017. - Т. 8. - № 1. - С. 18-31.
6. Бондарев, Б. А. Исследование прочностных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Строительные материалы. - 2017. - № 5. - С. 20-25.
7. Бондарев, Б. А. Исследование разрушения дорожных плит из сталефиброшлакобетона при продавливании [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н.

Черноусов, Р. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Транспортное строительство. - 2018. - № 7. - С. 10-12.

8. Бондарев, Б. А. Моделирование прочностных и деформационных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом возраста бетона [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Научный журнал строительства и архитектуры. - 2018. - № 2 (50). - С. 56-67.

9. Бондарев, Б. А. Новые возможности применения некондиционного сырья в строительстве [Текст] / Б. А. Бондарев, М. Ш. Саламанова, З. Х. Исмаилова // Строительные материалы. – 2023. – № 7. – С. 49-53.

10. Бондарев, Б. А. Определение параметров деформативности бетонных образцов по формулам механики разрушения [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Construction and Geotechnics. - 2020. - Т. 11. - № 2. - С. 88-98.

11. Бондарев, Б. А. Применение композиционных материалов в транспортном строительстве [Текст] / Б. А. Бондарев, В. А. Стурова, А. А. Ливенцева // В книге: "Школа молодых ученых" по проблемам технических наук. Материалы областного профильного семинара, Липецк. - 2020. - С. 186-188.

12. Бондарев, Б. А. Применение сталефиброшлакобетона в элементах конструкций транспортных сооружений [Текст] / Б. А. Бондарев, В. А. Стурова, С. В. Костин // В сборнике: Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве. Материалы международной научно-практической конференции. - 2019. - С. 14-18.

13. Бондарев, Б. А. Применение фибры Dramix производства компании БЕКАРТ в строительстве [Текст] / Б. А. Бондарев, О. В. Касарева, В. А. Стурова, А. А. Ливенцева // Современные проблемы материаловедения: Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 340-342.

14. Бондарев, Б. А. Сталефибробетон в дорожных покрытиях [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Мир дорог. – 2017. – № 101. – С. 67-68.

15. Бондарев, Б. А. Фибробетон: свойства, поведение при растяжении [Текст] / Б. А. Бондарев, В. А. Стурова, А. А. Ливенцева // Современные проблемы материаловедения: Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 284-287.

16. Бондарев, Б. А. Экспериментальное исследование характера взаимовлияния стальных фибр, равнонаправленно расположенных параллельно усилию в мелкозернистом шлакобетоне [Текст] / Б. А. Бондарев, Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – № 2 (71). – С. 72-82.

17. Бочарников, А. С. Прочность сталефибробетона на растяжение с учетом вероятного распределения фибровой арматуры [Текст] / А. С. Бочарников // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – С. 82-89.

18. Бочарников, А. С. Стойкие к динамическим нагрузкам и газопроницанию волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы для конструкций сооружений специального строительства : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Бочарников Александр Степанович. – Липецк, 2006. – 414 с.

19. Валуев, Д. В. Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие [Текст] / Д. В. Валуев, Р. А. Гизатулин // Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – 191 с.

20. Гончарова, М. А. Дорожные композиты в конструкциях автомобильных дорог и транспортных сооружений: монография [Текст] / М. А. Гончарова, В. А. Стурова, Е. В. Чурсин – Липецк-Елец, 2023. – 164с.

21. Гончарова, М. А. Способ подбора оптимального состава мелкозернистого сталефиброшлакопемзобетона [Текст] / М. А. Гончарова, Н. Н.

Черноусов, В. А. Стурова, А. А. Ливенцева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 11 (755). – С. 64-72.

22. Гончарова, М. А. Применение техногенного сырья в минеральных бетонах, для устройства конструктивного слоя дорожной одежды при строительстве автомобильных дорог [Текст] / М. А. Гончарова, А. С. Побежимов, Е. В. Моргачева // Современные проблемы материаловедения: Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 379-381.

23. Гончарова, М. А. Влияние фибрового армирования на прочностные свойства бетонной смеси [Текст] / М. А. Гончарова, К. А. Корнеев, Н. В. Иванищева // Объектно-пространственное проектирование уникальных зданий и сооружений: Материалы I научно-практического форума «SMARTBUILD», к 100-летию строительного образования в Ивановской области и создания инженерно-строительного факультета Иваново-Вознесенского политехнического института, 2018. – С. 123-125.

24. Губанова, А. А. Проблема фибробетонов в современном строительстве [Текст] / А. А. Губанова, А. Э. Оруджева, И. Р. Аляжетдинова // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОЙСК). – 2024. – № 1. – С. 275-277.

25. Гусев, Н. К. Строительство конструктивных слоев аэродромных и дорожных одежд из местных материалов [Текст] / Н. К. Гусев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 2. – С. 21–22.

26. Гудим, Ю. А. Современные способы безотходной утилизации шлаков [Текст] / Ю. А. Гудим, С. Г. Овчинников, И. Ю. Зинуров, // Сталь. – 2009. – №7. – С. 93–95.

27. Давидюк, А. Н. Фибробетон: свойства, технические требования и практика производства в Европе [Текст] / А. Н. Давидюк, Ю. С. Волков // Технологии бетонов. – 2019. – № 7-8 (156-157). – С. 10-16.

28. Данилов, А. М. Системный подход к конструированию композиционных материалов [Текст] / А. М. Данилов, И. А. Гарькина // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2012. - № 7. - С. 23-25.
29. Дворкин, Л. И. Метод оптимизации составов фибробетонов [Текст] / Л. И. Дворкин, О. М. Бордюженко, Н. М. Скрыпник // Технологии бетонов. – 2019. – № 3-4 (152-153). – С. 40-43.
30. Дураченко, А. В. Мелкозернистый фибробетон на основе техногенного песка и композиционного вяжущего [Текст] / А. В. Дураченко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 997-1001.
31. Ерофеев, В. Т. Порошково-активированные высокопрочные и сверхвысокопрочные фибробетоны и текстильбетоны нового поколения с улучшенными показателями прочности [Текст] / В. Т. Ерофеев, О. В. Тараканов, Н. И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 2 (59). С. 13-21.
32. Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы [Текст] / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, И. А. Чилин [и др.] // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 1 (40). – С. 92-104.
33. Ключев, А. В. К вопросу применения техногенных песков для производства мелкозернистого фибробетона [Текст] / А. В. Ключев, А. В. Нетребенко, А. В. Дураченко [и др.] // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – Т. 19. – № 1. – С. 32-34.
34. Козлова, И. В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов: теоретическое исследование [Текст] / И. В. Козлова, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31. – № 3. – С. 284-297.
35. Колодяжный, Д. Н. Фибробетон [Текст] / Д. Н. Колодяжный, А. А. Колпаков, Н. С. Куликов [и др.] // Интернаука. – 2019. – № 40-1(122). – С. 12-13.

36. Косарев, В. М. Расчет прочности по нормальным сечениям изгибаемых элементов с хаотическим дискретным армированием: фибробетон и его применение в строительстве [Текст] / В. М. Косарев. - М.: НИИЖБ, 1979. - С. 130-137;

37. Коротких, Д. Н. Прогнозирование прочности и контроль качества укладки монолитного бетона в конструкциях с несъемной опалубкой [Текст] / Д. Н. Коротких, Д. Е. Капустин // Железобетонные конструкции. – 2024. – Т. 8. – № 4. – С. 55-69.

38. Коротких, Д. Н. Опыт системной экспериментальной оценки современных высокотехнологичных бетонов по комплексу критериев сопротивления разрушению [Текст] / Д. Н. Коротких, Е. М. Чернышов // Бетон и железобетон. – 2021. – № 1(603). – С. 30-39.

39. Коротких, Д. Н. Изменение потенциала сопротивления разрушению современных бетонов как следствие теплового стимулирования эволюции их цементной матрицы в эксплуатационном цикле [Текст] / Д. Н. Коротких, Е. М. Чернышов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Ответственный редактор Т.А. Низина, 2018. – С. 219-231.

40. Кочетков, А. В. Обоснование закона распределения и статистических характеристик длины нитей фибры для армирования асфальтобетонной смеси [Текст] / А. В. Кочетков, С. Ю. Андронов, В. В. Столяров [и др.] // Умные композиты в строительстве. – 2023. – Т. 4. – № 3. – С. 55-65.

41. Кочетков, А. В. Процессы деформирования под действием транспортной нагрузки в тонких слоях гидроизоляции мостовых сооружений [Текст] / А. В. Кочетков, Ш. Н. Валиев, А. Н. Каменских [и др.] // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Материалы IX Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2022. – С. 44-48.

42. Кочетков, А. В. Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим

[Текст] / А. В. Кочетков, С. Ю. Андронов, А. Ф. Иванов // Строительные материалы. – 2020. – № 4-5. – С. 62-67.

43. Кузьмич, Н. П. Расширение ресурсной базы строительного комплекса на основе применения местного сырья и энергоресурсоэффективных технологий [Текст] / Н. П. Кузьмич // Проблемы современной экономики. – 2012. – № 2(42). – С. 325–328.

44. Курбатов, Л. Г. Сталефибробетонные конструкции в строительстве [Текст] / Л. Г. Курбатов, Ю. И. Ермилов // Обзорная информация. ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. - М., 1983. - 58с.

45. Лесовик, В. С. Строительные материалы. Настоящее и будущее [Текст] / В. С. Лесовик // Вестник МГСУ, 2017. – № 1. – С. 9-16.

46. Лобанов, И. А. Технологические приемы улучшения прочностных характеристик фибробетона [Текст] / И. А. Лобанов, А. В. Копацкий, К. В. Талантова // Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них. Рига. - Л.: 1981. - С. 19.

47. Лобанов, И. А. Структура дисперсно-армированных матриц и способы ее технологического регулирования : автореф. дисс. докт. техн. наук : 05.23.05 / Лобанов Игорь Александрович. - Л., 1980. - С. 32.

48. Мершеева, М. Б. Нормативные документы для расчёта усиления железобетонных конструкций фибробетоном [Текст] / М. Б. Мершеева // Современные проблемы строительства зданий и сооружений в суровых условиях: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции строителей. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет»; ответственный редактор Н. П. Сигачев, 2018. – С. 18-20.

49. Морозова, Н. Н. Бетонные отходы: организация переработки, свойства и применение [Текст] / Н. Н. Морозова, А. Р. Гиззатуллин, А. П. Аксаков [и др.] // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2022. – № 1(10). – С. 32 – 46.

50. Национальный проект «Инфраструктура для жизни» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/infrastruktura-dlya-zhizni/>.

51. Национальный проект «Региональная и местная дорожная сеть» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/bezopasnye-kachestvennye-dorogi/regionalnaya-i-mestnaya-dorozhnaya-set/>.

52. Некрасов, В. П. Новейшие приемы и задачи железобетонной техники [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 27, 28. – С. 247 – 259.

53. Некрасов, В. П. Новейшие приемы и задачи железобетонной техники, система свободных связей : Цемент, его производство и применение [Текст] / В. П. Некрасов // Зодчий. – 1908. – № 8, 9. – С. 294 – 348.

54. Некрасов, В. П. Метод косвенного вооружения бетона [Текст] / В. П. Некрасов – М.: Транспечать, 1925. – С. 262.

55. Панова, А. А. Фибробетоны для дорожного строительства [Текст] / А. А. Панова // Дизайн XXI века: Материалы IV Всероссийской научно-практической интернет-конференция с международным участием. Тула, 2020. – С. 295-300.

56. Патуроев, В. В. Полимербетоны [Текст] / В. В. Патуроев – Стройиздат. Москва, 1987. – С. 286.

57. Пухаренко, Ю. В. Высокопрочный сталефибробетон [Текст] / Ю. В. Пухаренко, В. Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. - 2007. – № 9. – С. 114-117.

58. Пухаренко, Ю. В. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне [Текст] / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. –2022. – Т.19. – № 3(85). – С. 436-445.

59. Пухаренко, Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов : автореф. дис. докт. техн. наук : 05.23.05 / Пухаренко Юрий Владимирович. – СПб, 2005. – 42 с.

60. Прусис, Г. А. Панель-оболочка из дисперсно-армированного бетона с предварительным напряжением [Текст] / Г. А. Прусис, Ф. Ц. Янкелевич, К. Я. Гайметис // Дискретно-армированные бетоны и конструкции из них. Рига, ЛатИНТИ. – 1975. – С. 80-82.
61. Рабинович, Ф. Н. Бетоны с дисперсно-армированные волокнами : Обзорная информация [Текст] / Ф. Н. Рабинович // Сер. "Промышленность сборного железобетона". - М: ВНИИЭСМ, 1976. - 72 с.
62. Рабинович, Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны [Текст] / Ф. Н. Рабинович - М.: Стройиздат, 1989. - 176 с.
63. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции [Текст] / Ф. Н. Рабинович - М.: Издательство АСВ, 2011. - 642 с.
64. Ракитченко, К. С. Разработка состава фибробетона с применением композиционных вяжущих для ремонта мостовых конструкций [Текст] / К. С. Ракитченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 1. – С. 38-42.
65. Романенко, И. И. Вторичное использование в дорожном строительстве щебня полученного из дробленого бетона [Текст] / И. И. Романенко, М. И. Романенко, И. Н. Петровнина [и др.] // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 1(26). – С. 86.
66. Савчук, В. Б. Особенности перевозки щебня в 2017 г. [Текст] / В. Б. Савчук // Вестник транспорта: Материалы IV Международной конференции: рынок щебня России. 15.06.2017. – Москва, 2018. – № 3. – С. 32–37.
67. Сазонова, С. А. Испытания конструкций из фибробетона на прочность при изгибе [Текст] / С. А. Сазонова, С. Д. Николенко, Е. Н. Епифанов // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор И. В. Четверикова. – Воронеж, 2021. – С. 271-278.
68. Семенов, А. А. Российский рынок щебня и гравия: итоги последних лет [Текст] / А. А. Семенов // Строительные материалы. – 2010. – №. 3. – С. 17–19.

69. Скутин, А. И. О качестве щебня, применяемого в транспортном строительстве [Текст] / А. И. Скутин // Инновационный транспорт. – 2019. – № 1(31). – С. 25–28.

70. Скоробогатов, А. Р. Испытания щебня по новым ГОСТ [Текст] / А. Р. Скоробогатов, М. А. Гончарова // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной памяти профессора В. И. Калашникова. Под общей редакции М. О. Коровкина и Н. А. Ерошкиной. – 2023. – С. 176-18.

71. Славчева, Г. С. Влияние концентрации и гранулометрического состава наполнителей на структурно-механические свойства цементных систем [Текст] / Г. С. Славчева, А. И. Ибряева // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2019. – № 2(2). – С. 29-36.

72. Стурова, В. А. Модель выдергивания фибры из композиционной матрицы [Текст] / В. А. Стурова, А. А. Ливенцева, Б. А. Бондарев // В книге: "Школа молодых ученых" по проблемам технических наук. Материалы областного профильного семинара, Липецк. - 2020. - С. 183-185.

73. Стурова, В. А. Сталефибробетон с применением отходов местных производств для транспортных сооружений [Текст] / В. А. Стурова // Строительные материалы. – 2023. – № 1-2. – С. 44-49.

74. Стурова, В. А. Свойства стальной фибры Dramix производства компании Бекарт и возможность ее применения в строительстве [Текст] / В. А. Стурова, Е. В. Чурсин // В сборнике: Тенденции развития современной науки. сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2 ч. Липецк. - 2021. - С. 331-334.

75. Стурова, В. А. Расчет геометрических характеристик нормальных сечений изгибаемых комбинированно армированных композитов при

деградационных процессах с применением ЭВМ : учебное пособие / В. А. Стурова. – Липецк, 2022. – 64 с.

76. Толымбекова, Л. Б. Переработка и повторное использование отходов металлургического предприятия [Текст] / Л. Б. Толымбекова // Главный энергетик. – 2022. – № 1. – С. 31–35.

77. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozm-na-period-do-2035-goda>.

78. Трамбовецкий, Б. П. Зарубежный опыт применения фибробетона в строительстве [Текст] / Б. П. Трамбовецкий // Фибробетон и его применение в строительстве. М., НИИЖБ, 1979. – С. 38-45.

79. Тулаев, А. Я. Дорожные одежды с использованием шлаков [Текст] / А. Я. Тулаев, М. В. Королев – М.: Транспорт, 1986. – 221 с.

80. Тюрюханов, К. Ю. Опыт использования техногенных материалов в строительной отрасли [Текст] / К. Ю. Тюрюханов, К. Г. Пугин, В. К. Пугина // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – № 1. – С. 54–60.

81. Усачев, С. М. Инновационная технология в дорожном строительстве [Текст] / С. М. Усачев, Д. В. Сысоева // Научный журнал ВГТУ «Инновации, технологии и бизнес». – 2019. – № 1(5). – С. 64-67.

82. Усачев, С. М. Подбор состава бетона с комплексными добавками для дорожного строительства [Текст] / С. М. Усачев, М. А. Чурсина, А. Д. Ерочкина [и др.] // Научный журнал ВГТУ «Химия, физика и механика материалов». – 2019. – № 2(21). – С. 162-172.

83. Хаджишалапов, Г. Н. Исследование альтернативных источников сырья для строительной отрасли. Физико-механические свойства модифицированного бетона на основе вторичного щебня [Текст] / Г. Н. Хаджишалапов, М. П. Нажуев, У. И. Исаева [и др.] // Научные исследования: итоги и перспективы. – 2023. – Т. 4. – № 2. – С. 52–59.

84. Черноусов, Н. Н. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии [Текст] / Н. Н. Черноусов, Б. А. Бондарев, В. А. Стурова [и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 5. – С. 58-67.

85. Черноусов, Н. Н. Структурная модель фибробетона [Текст] / Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов // Сборник статей научно-практической конференции «Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре», посвященной 50-летию Липецкого государственного университета – Липецк: ЛГТУ, 2006. – С. 30-35

86. Черноусов, Н. Н. Исследование характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) конструкционного шлакобетона при равновесных механических испытаниях [Текст] / Н. Н. Черноусов, В. В. Галкин, Р. Н. Черноусов [и др.] // Сборник научных трудов преподавателей и сотрудников, посвященный 30-летию научно-исследовательского сектора Липецкого государственного технического университета – Липецк: ЛГТУ, 2003. Ч.1. – С. 157-160.

87. Черноусов, Н. Н. Испытание сталефибробетона на центральное растяжение методом расклинивания [Текст] / Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, А. А. Кораблин // Сборник статей научно-практической конференции «Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре». – Липецк: ЛГТУ, 2007. – С. 189-190.

88. Черноусов, Н. Н. Математическая модель полной диаграммы деформирования шлакобетона при трехточечном изгибе [Текст] / Н. Н. Черноусов, В. А. Стурова // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 3. – С. 92-96

89. Черноусов, Н. Н. Математическое моделирование прочности центрально сжатого тонкостенного сталефибробетонного элемента [Текст] / Н. Н. Черноусов, В. А. Стурова, Е. В. Чурсин [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 2. – С. 81-87.

90. Черноусов, Н. Н. Прогнозирование характера деформирования изгибаемых шлакобетонных элементов [Текст] / Н. Н. Черноусов, Б. А. Бондарев, В. А. Стурова [и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 3. – С. 15-24.

91. Черноусов, Р. Н. Моделирование работы стержневой и проволочной арматуры [Текст] / Р. Н. Черноусов, И. О. Дедюхин // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов инженерно-строительного факультета Липецкого государственного технического университета – Липецк: ЛГТУ, 2005. – С. 41-44.

92. Черноусов, Р. Н. Прогнозирование изменения прочности сталефиброшлакобетонных дорожных покрытий во времени [Текст] / Р. Н. Черноусов, Н. Н. Черноусов, Б. А. Бондарев [и др.] // Транспортное строительство. – 2010, - № 4. - Москва, 2010. - С. 23-26.

93. Чернышов, Е. М. Строительно-технологическая утилизация техногенных отходов как комплексная системная эколого-экономическая проблема развития территорий и градостроительства [Текст] / Е. М. Чернышов, Н. Д. Потамошнев, П. В. Монастырев, В. П. Ярцев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2016. – № 4(62). – С. 67-86.

94. Чернышов, Е. М. Строительно-технологическая утилизация много-тоннажных отходов отраслей промышленности как основа формирования чистой биотехносферно-совместимой региональной среды [Текст] / Е. М. Чернышов, И. И. Акулова // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой 40-летию юбилею Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ. – 2019. – С. 85-89.

95. Шестаков, Н. И. От металлургического шлака к устойчивому дорожному строительству: оценка возможностей и технологий [Текст] / Н. И. Шестаков, В. А. Астафьева, В. В. Лебедев [и др.] // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2023. – № 4(44). – С. 74–83.

96. Янkelович, Ф. Ц. Прогнозирование упругих и прочностных свойств хаотически дисперсно-армированных сред [Текст] / Ф. Ц. Янkelович, А. А. Калнайс // Конструкции и материалы в строительстве. Вопросы строительства. Вып. VI - Рига: Звайгзне, 1978. - С. 136 – 143

97. Zenkov, I. V. et al. Cumulative production potential of quarries to supply crushed stone factories in Russia: An overview [Text] // Eurasian Mining. – 2021. – №. 1. – P. 45–48.
98. Bondarev, B Simulation of the strain diagram of a slag-concrete element subject to bending [Text] / B Bondarev, V Sturova, N Chernousov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 911, III International Scientific and Practical Conference "Advanced Building Materials and Technologies 2020" 26-29 May 2020, Kaliningrad, Russian Federation.
99. Godfrey, K. Fibre cement and concrete [Text] / K. Godfrey // Civil Engineering.- 1982. - № 10.
100. Grejory, J. Full-scale trials of wire fibre-reinforced concrete overlay on Motorway. Fibre reinforced cement and concrete [Text] / J. Grejory, J. W. Galloway, K. D. Haithy // HILKM Symposium 1975 London. Construction Press Ltd.- 1975. – P. 383-394.
101. Griffith, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions [Text] / A. A. Griffith // The Royal Society of London, Vol 221.- 1931. -P. 161-198.
102. Chernousov, N. Modelling the strength and stress-strain behavior of steel fiber reinforced concrete with slag under axial tension and compression considering the age of the concrete matrix [Text] / N. Chernousov, V. Sturova, M. Goncharova // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 55, 3, 2020. - C.632-639.
103. Nevskaya, M. A. Challenges and opportunities of state regulation of the innovation process in the Russian mineral resources sector [Text] / M. A. Nevskaya, O. A. Marinina //Academy of Strategic Management Journal. – 2017. – T. 16. – P. 149.
104. Fibrous concrete. The concrete society [Text]: Proceedings of the Symposium on Fibrous Concrete held in London on 16 th April 1980. - London Construction Prees Ltd., - 1980. - 202 p.
105. Highway Focus [Text]. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C. – 1972. – Vol. 4 - №5. – 98 p.

106. Krasnovsky, R. Complete diagrams of strain under axial tension of steel-fiber reinforced concrete with different fiber types and content [Text] / R. Krasnovsky, D. Kapustin, D. Korotkikh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7. Ser. "VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2020" 2021. – P. 012-013.

107. Polikutin, A. E. Comparative analysis of the durability of normal sections reinforced rubber concrete with fiber and reinforced concrete bending elements [Text] / A. E. Polikutin, A. V. Levchenko, D. N. Korotkih // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vladivostok, 2018. – P. 22-40.

108. Romualdi, G. P. The Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement [Text] / G.P. Romualdi, G.B. Batson // - ACI Journal.- 1963. - Vol. 60. -№ 6. - P. 775 – 790.

109. Romualdi, G. P. Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement [Text] / G. P. Romualdi, G. A. Mandel // ACI Journal – 1964. - Vol. 61. - №6. - P. 657 – 672.

110. Samarai, M. A. The Influence of Fibres Upon Crack Development in reinforced Concrete Subject to Uniaxial Tension [Text] / M. A. Samarai, R. H. Elvery // “Magazine of Concrete research”- 1974. - №89. - P. 203-211.

111. Swamy, R. N. Theory for the flexural strength of steel fiber reinforced concrete [Text] / R. N. Swamy, P. S. Mangat // Cement and Concrete Research – 1974. - Vol.4. -№2.- P. 313-325.

112. Swamy, R. N. The onset of cracking and ductility of steel fiber concrete [Text] / R. N. Swamy, P. S. Mangat // Cement and Concrete Research – 1975. - № 1. - P. 37-53.

113. Swamy, R. N. Fiber reinforced cement of cement and concrete / R. N. Swamy // Materiaux et Constructions – 1975. – Vol. 8 - № 45. - P. 235-254.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Результаты определения основных физико-механических свойств
мелкозернистого шлакопемзобетона**

Таблица А.1 – Определение призмной прочности

Кубиковая прочность бетона, $\bar{R}$ МПа	Нормативное значение кубиковой прочности, R_n МПа	Призмная прочность*, МПа		Отношение $\frac{\bar{R}_b}{\bar{R}}$
		После 28 дней нормального хранения, $\bar{R}_b$, МПа	Вычисленное по СП 63.13330.2018, $R_{b,n}$, МПа	
33,6	26,2	29,0	19,3	0,86
38,0	29,6	39,6	21,6	1,04

* - по данным испытаний шести образцов близнецов.

$R_{b1} = 27,6$ МПа; $R_{b2} = 26,8$ МПа; $R_{b3} = 27,8$ МПа; $R_{b,ср.} = 27,4$ МПа;.

Таблица А.2 –Результаты испытаний на растяжение

Кубиковая прочность $\bar{R}$, МПа	Прочность на растяжение, МПа			
	При испытании кубов на раскалывание	При испытании балочек на изгиб	Вычисленная по формуле $R_{t,n} = 0,2\sqrt[3]{(R_n)^2}$ ($R_t = 0,19\sqrt[3]{(B)^2}$)	Вычисленная по СП 63.13330.2018 $R_{t,n}$
1	2	3	4	5
33,6	-	2,5	1,76 (1,83)	1,95
	-	3,36		2,62
	-	2,05		1,6
38,0	-	1,87	1,92 (2,22)	1,46
	-	1,96		1,53
	-	2,14		1,67
33,6	3,53	-	1,76 (1,83)	2,75
	2,8	-		2,18
	3,32	-		2,58
	2,9	-		2,26
	2,69	-		2,1

Продолжение приложения А

Продолжение таблицы А.2

1	2	3	4	5
38,0	2,9	-	1,92(2,22)	2,26
	2,66	-		2,07
	2,45	-		1,91
	2,9	-		2,26
	3,03	-		2,36

Таблица А.3 – Определение модуля упругости при сжатии шлакопемзобетона класса В30 и В40

№ п/п	Р, кН	σ , МПа	$\varepsilon_{\text{полн.}}$			$\varepsilon_{\text{ост.}}$		
			№ образца			№ образца		
			1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Для класса В30								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	13	1,3	6	7	7	0	0	0
2	26	2,5	11	13	12	0	0	0
3	13	1,3				6	8	8
4	52	5,1	21	22	23			
5	13	1,3				6	8	9
6	78	7,6	31	33	33			
7	13	1,3				6	8	10
8	104	10,1	42	42	45			
9	13	1,3				8	10	11
10	13	12,7	56	58	56			
11	13	1,3				11	13	13
12	156	15,2	73	76	74			
13	13	1,3				15	16	17
14	182	17,7	97	97	95			

Продолжение таблицы А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Для класса В40								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	20	1,9	9	7	9	0	0	0
2	40	3,8	17	17	17	0	0	0
3	20	1,9				8	9	10
4	80	7,6	34	35	34			
5	20	1,9				10	11	11
6	120	11,4	54	54	53			
7	20	1,9				13	13	14
8	160	15,2	76	75	76			
9	20	1,9				18	18	19
10	200	19,0	100	97	98			
11	20	1,9				22	23	23
12	240	22,9	128	122	122			

Результаты определения влияния крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси

Таблица Б.1 – Структурная вязкость раствора и удобоукладываемость мелкозернистого бетона

Модуль крупности песка	Жесткость, сек			Содержание фракций песка, %	Структурная вязкость, Па · с
	B20	B22,5	B30		
1,5	30	30	34	0	3,4
1,71	25	28	29	4	2,6
1,95	20	25	27	8	2,2
2,27	22	28	32	12	2,16
2,47	35	43	55	16	2,1
2,73	44	58	90	20	2,2
2,94	60	77	-	24	2,7

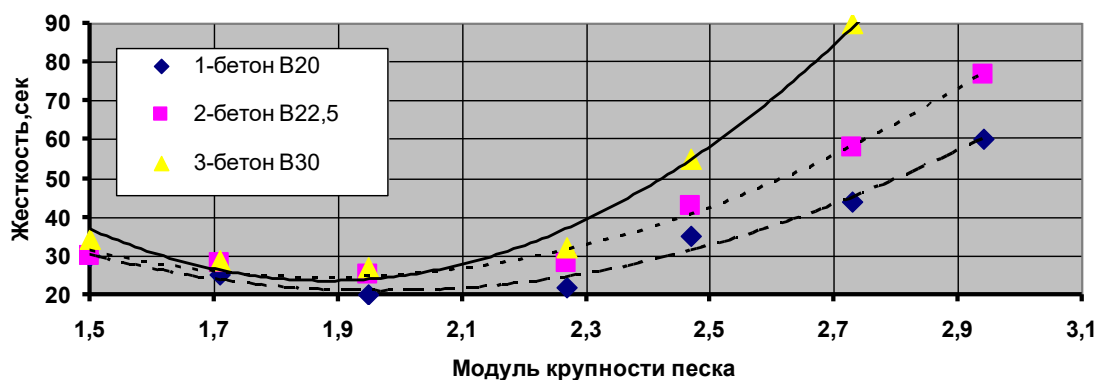


Рисунок Б.1 – Зависимость удобоукладываемости бетонной смеси на шлаковом песке от его крупности



Рисунок Б.2 – Зависимость структурной вязкости растворной смеси на шлаковом песке от содержания фракции 0,14 мм

Экспериментальные данные водопотребности бетонной и фибробетонной смесей

Таблица В.1 – Водопотребность бетонной смеси в зависимости от ее жесткости

Жесткость смеси сек	Водопотребность (В/Ц)					
	Ц=420кг	Ц=450	Ц=490	Ц=540	Ц=600	Ц=670
	Ц:П=1:4	Ц:П=1:3	Ц:П=1:2,5	Ц:П=1:2	Ц:П=1:1,5	Ц:П=1:1
	Класс бетона В15	Класс бетона В20	Класс бетона В25	Класс бетона В30	Класс бетона В35	Класс бетона В40
1	0,75	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3
2	0,7	0,55	0,47	0,38	0,33	0,28
3	0,6	0,5	0,45	0,37	0,3	0,26
5	0,55	0,46	0,4	0,35	0,27	0,24
10	0,5	0,4	0,35	0,33	0,25	0,22
15	0,45	0,38	0,35	0,3	0,23	0,22
20	0,4	0,35	0,28	0,27	0,22	0,22
25	0,35	0,33	0,3	0,26	0,22	0,22
30	0,33	0,3	0,28	0,25	0,22	0,2
40	0,3	0,28	0,28	0,25	0,22	0,2
50	0,27	0,25	0,25	0,25	0,22	0,2

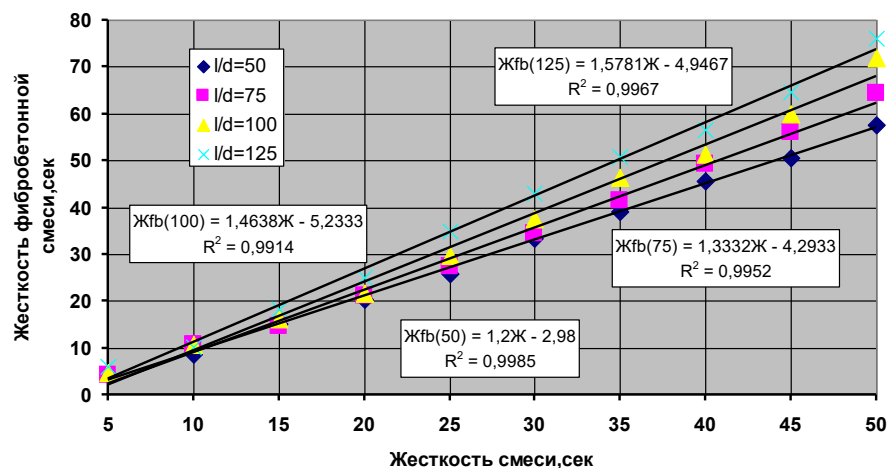


Рисунок В.1 – Зависимость жесткости фибробетонной смеси от жесткости бетон-матрицы и относительной длины фибр (l/d) при объемном армировании $\mu_{fv} = 0,5\%$

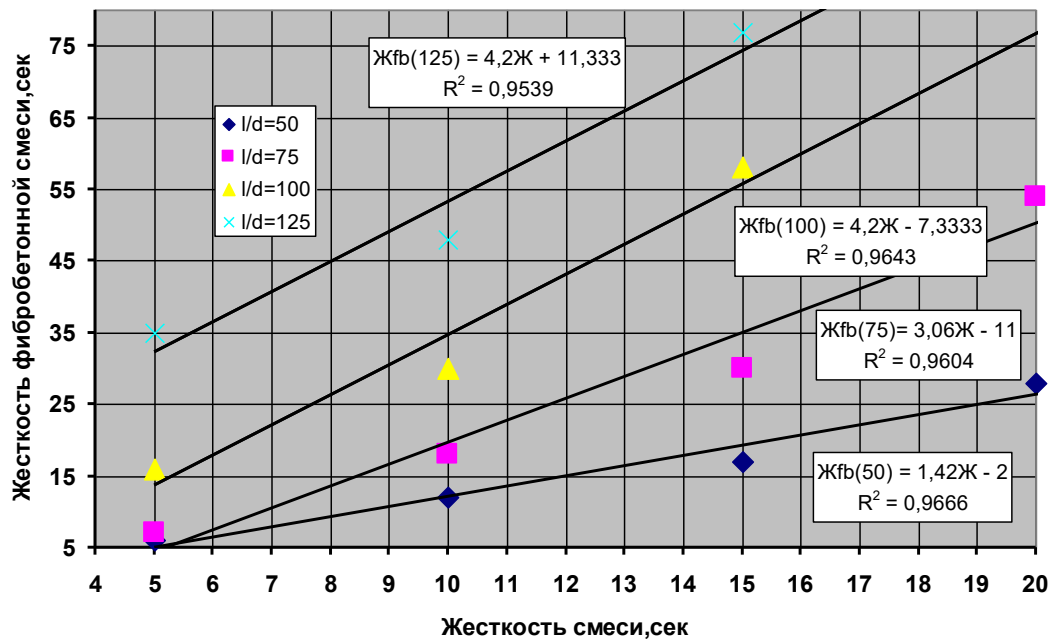


Рисунок В.2 – Зависимость жесткости фибробетонной смеси от жесткости бетон-матрицы и относительной длины фибр (l/d) при объемном армировании $\mu_{fv} = 1,0\%$

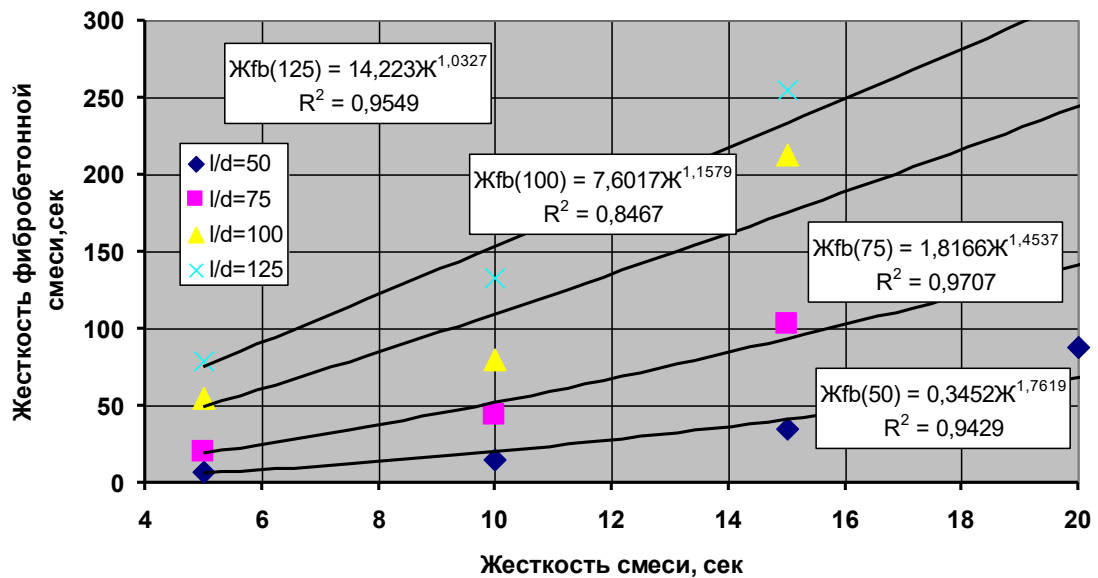


Рисунок В.3 – Зависимость жесткости фибробетонной смеси от жесткости бетон-матрицы и относительной длины фибр (l/d) при объемном армировании $\mu_{fv} = 1,5\%$

Плоскостное ориентирование фибры в опытных образцах

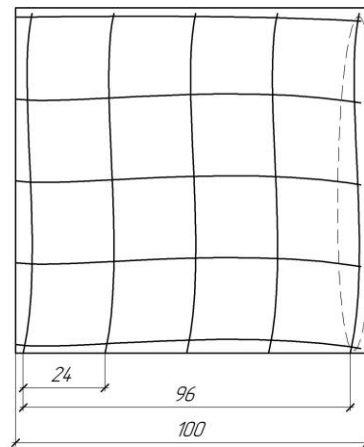
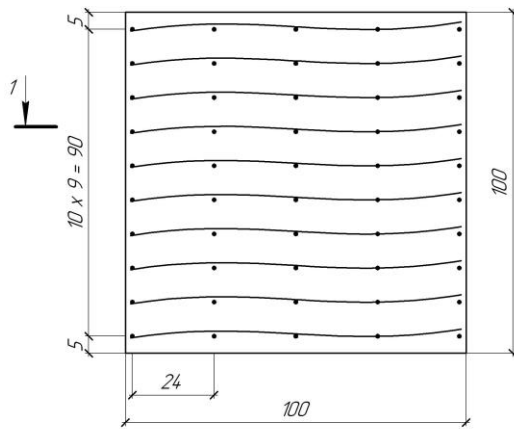
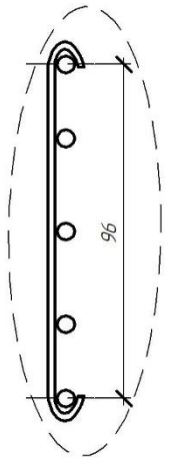
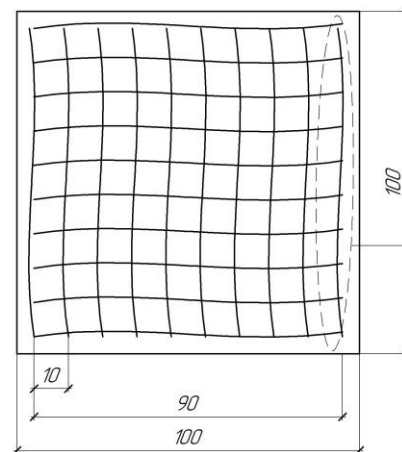
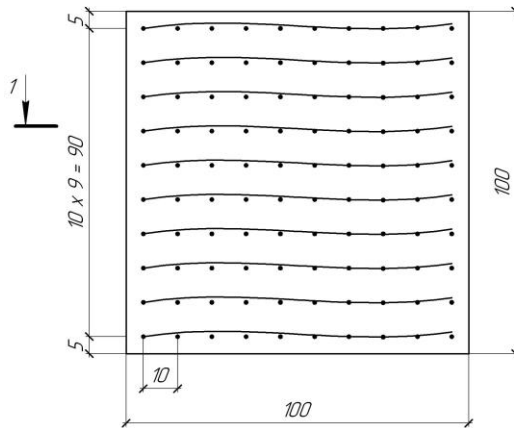
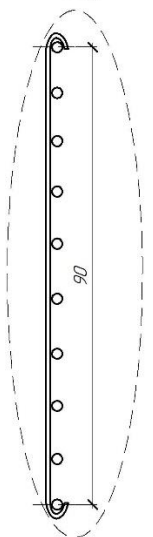
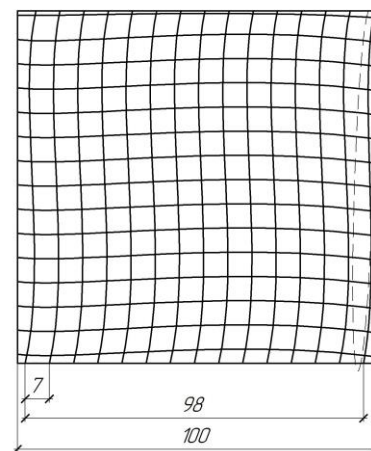
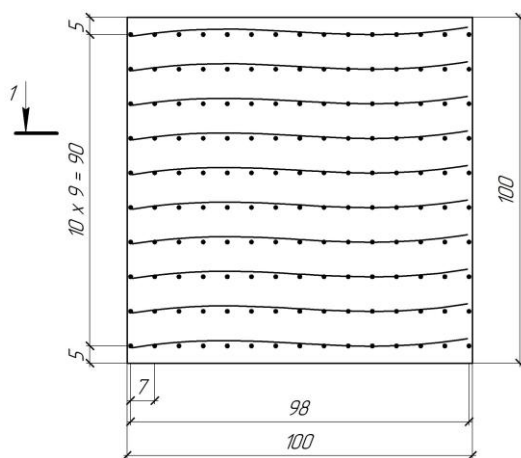
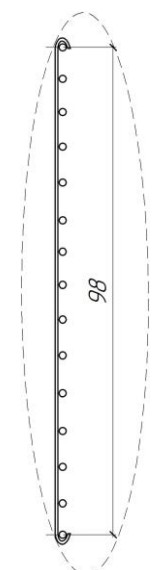
 $\mu = 0,5 \%$ 5 штук1-1 $\mu = 1,0 \%$ 10 штук1-1 $\mu = 1,5 \%$ 15 штук1-1

Рисунок Г.1 – Армирование сжатых элементов сетками из проволоки (гладкой) стальной низкоуглеродистой - диаметром 0,8 мм (ГОСТ 3282-74)

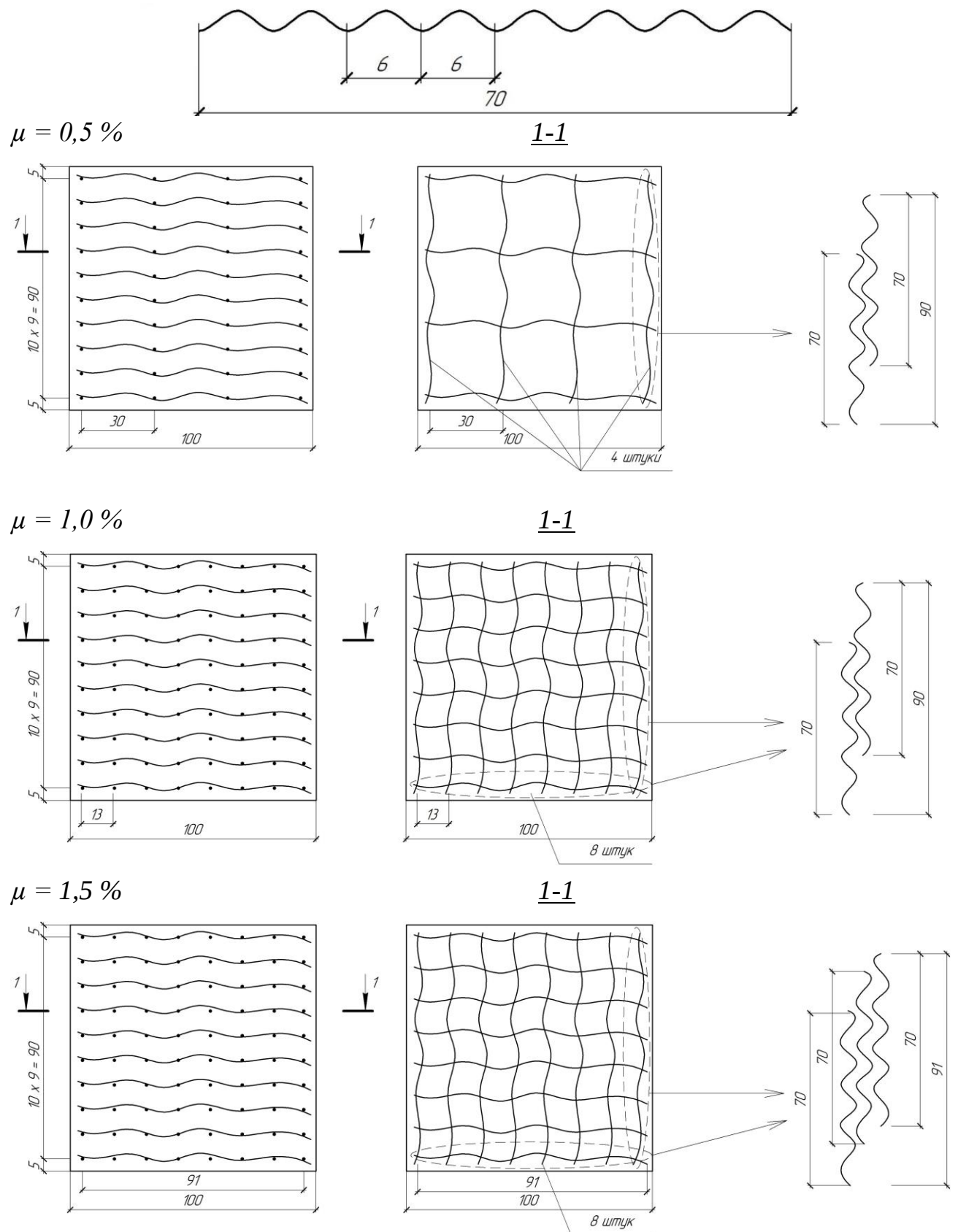


Рисунок Г.2 – Армирование сжатых элементов сетками из проволоки (волнистой)

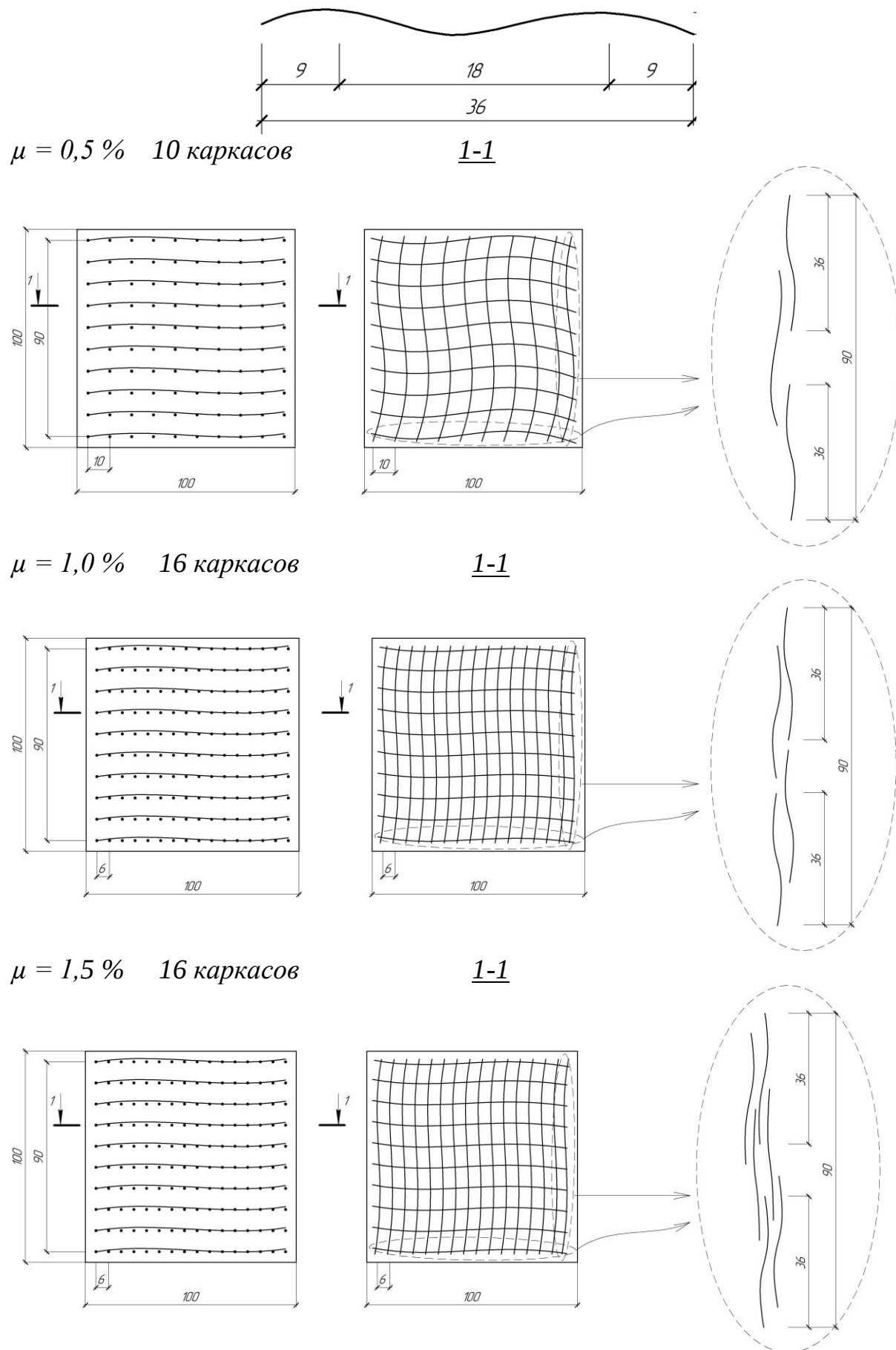


Рисунок Г.3 – Армирование сжатых элементов сетками из листовой фибры

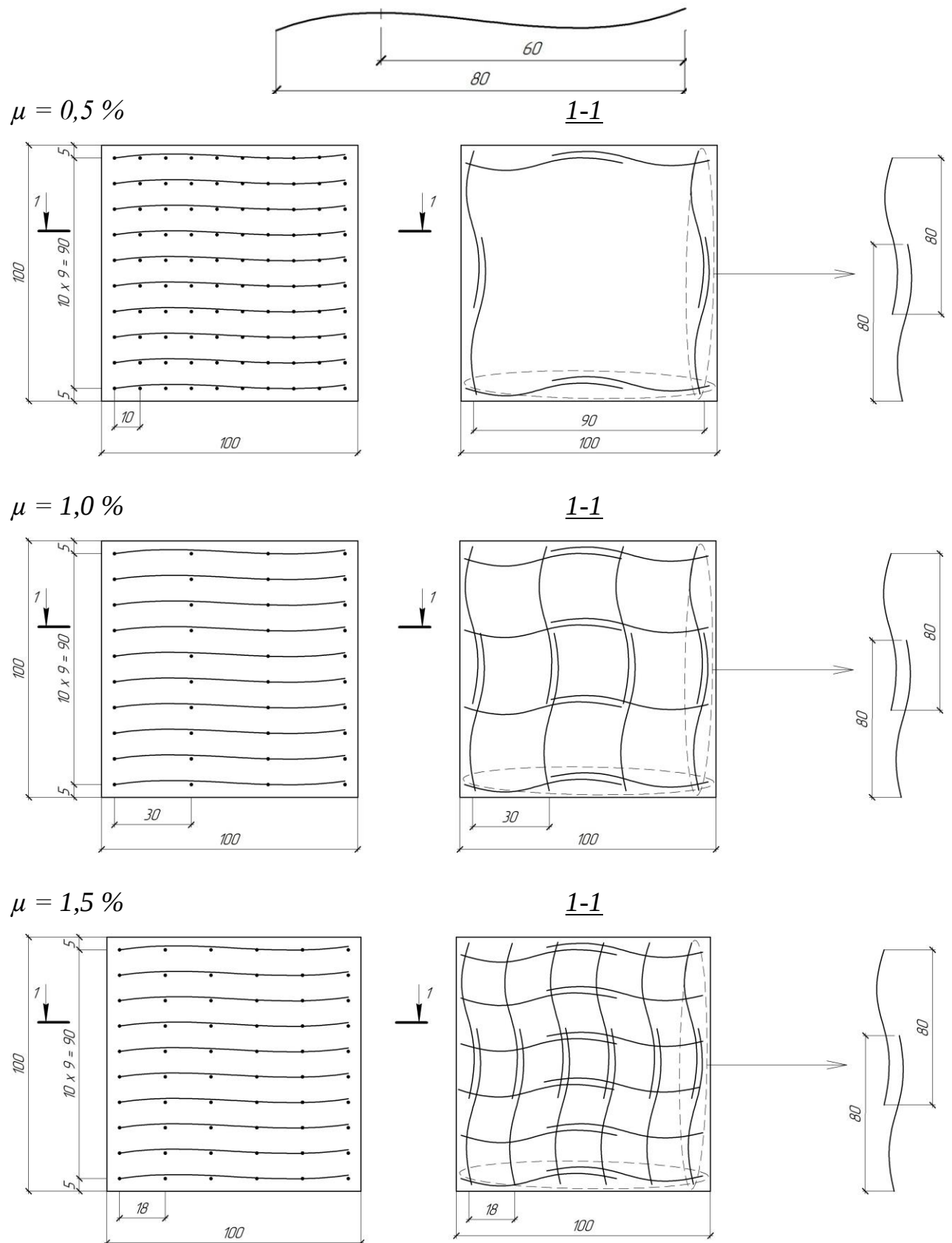


Рисунок Г.4 – Армирование сжатых элементов сетками из тросовой фибры

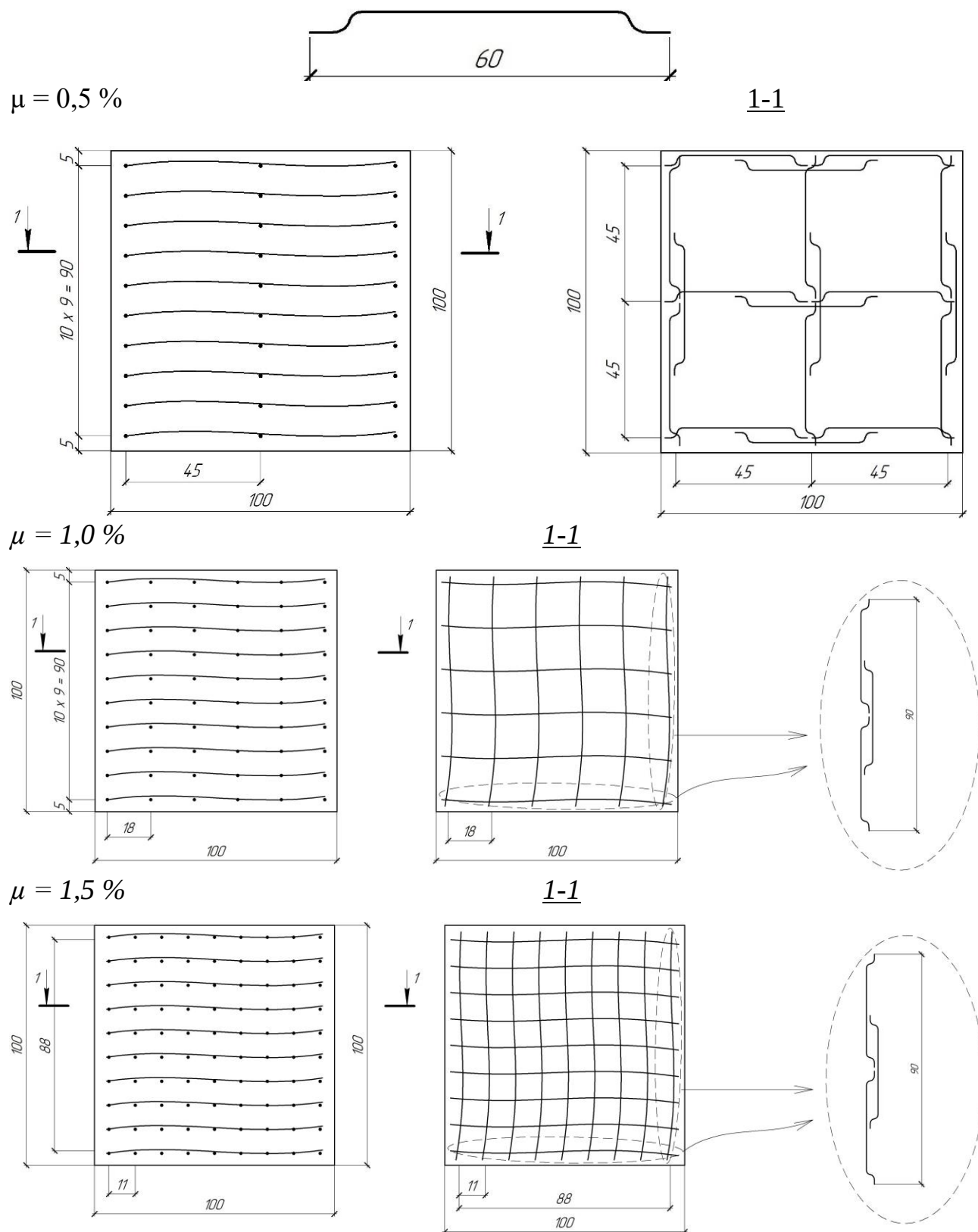


Рисунок Г.5 – Армирование сжатых элементов сетками из фибры «Драмикс»

Опытные и расчетные значения степени расслаиваемости фибр
(k_{st}) и времени вибрирования фибробетонной смеси (t_{exp})

Таблица Д.1 – Определение степени расслаиваемости (k_{st}) смеси

Жесткость смеси,	Время вибрирования	2 слоя		k_{st} по (2.1)	3 слоя			k_{st} по (2.2)
		m_1	m_2		m_1	m_2	m_3	
сек	сек	г	г	-	г	г	г	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu = 0,5\%$ (фибра из проволоки гладкой $d_f = 0,8$ мм, $l_f = 97$ мм)								
10	8	23	16	1,098592	16	12	11	1,093458
20	30	22	17	1,068493	15	13	11	1,073394
30	60	21	18	1,04	15	12	12	1,054054
40	150	24	15	1,130435	16	13	10	1,114286
50	240	24	15	1,130435	15	16	8	1,135922
$\mu = 1,0\%$ (фибра из проволоки гладкой $d_f = 0,8$ мм, $l_f = 97$ мм)								
10	6	40	38	1,012987	29	22	27	1,017391
20	30	44	34	1,068493	29	29	20	1,083333
30	90	49	29	1,147059	32	30	16	1,158416
40	180	51	27	1,181818	34	27	17	1,17
50	300	52	26	1,2	33	31	14	1,193878
$\mu = 1,5\%$ (фибра из проволоки гладкой $d_f = 0,8$ мм, $l_f = 97$ мм)								
10	16	82	35	1,251337	51	50	16	1,24911
20	60	82	35	1,251337	54	44	19	1,24911
30	80	71	46	1,119617	49	39	29	1,128617
40	180	77	40	1,187817	52	39	26	1,173913
50	300	78	39	1,2	47	51	19	1,189831
$\mu = 0,5\%$ (фибра из проволоки волнистой $d_f = 0,63$ мм, $l_f = 70$ мм)								
10	11	23	16	1,098592	16	13	10	1,114286
20	30	20	19	1,012987	15	11	13	1,035398
30	90	23	16	1,098592	14	16	9	1,093458
40	180	24	15	1,130435	16	13	10	1,114286

Продолжение таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	300	24	15	1,130435	15	16	8	1,135922
$\mu=1,0\%$ (фибра из проволоки волнистой $d_f=0,63\text{мм}$, $l_f=70\text{ мм}$)								
10	8	41	37	1,026316	29	23	26	1,026316
20	30	41	37	1,026316	29	23	26	1,026316
30	120	49	29	1,147059	32	31	15	1,17
40	240	51	27	1,181818	34	28	16	1,181818
50	360	51	27	1,181818	33	30	15	1,181818
$\mu=1,5\%$ (фибра из проволоки волнистой $d_f=0,63\text{мм}$, $l_f=70\text{ мм}$)								
10	17	79	38	1,212435	51	47	19	1,222997
20	60	78	39	1,2	51	44	22	1,197952
30	95	69	48	1,098592	48	39	30	1,114286
40	210	74	43	1,152709	51	39	27	1,158416
50	300	72	45	1,130435	45	49	23	1,143322
$\mu=0,5\%$ (фибра из листа $d_f=0,49\text{мм}$, $l_f=44\text{ мм}$)								
10	14	23	16	1,098592	16	13	10	1,114286
20	45	22	17	1,068493	15	13	11	1,073394
30	90	21	18	1,04	14	13	12	1,035398
40	180	22	17	1,068493	14	14	11	1,054054
50	360	24	15	1,130435	15	15	9	1,114286
$\mu=1,0\%$ (фибра из листа $d_f=0,49\text{мм}$, $l_f=44\text{ мм}$)								
10	10	41	37	1,026316	29	23	26	1,026316
20	40	41	37	1,026316	29	25	24	1,044643
30	120	46	32	1,098592	31	26	21	1,093458
40	240	48	30	1,130435	32	27	19	1,125
50	360	47	31	1,114286	31	30	17	1,135922
$\mu=1,5\%$ (фибра из листа $d_f=0,49\text{мм}$, $l_f=44\text{ мм}$)								
10	20	77	40	1,187817	49	49	19	1,206186
20	70	74	43	1,152709	48	45	24	1,158416
30	120	70	47	1,109005	48	39	30	1,114286
40	210	70	47	1,109005	47	39	31	1,100313

Продолжение таблицы Д.1

50	320	69	48	1,098592	45	44	28	1,107256
$\mu = 0,5\%$ (фибра из троса $d_f = 1,0$ мм, $l_f = 80$ мм)								
10	7	24	15	1,130435	16	13	10	1,114286
20	30	24	15	1,130435	15	16	8	1,135922
30	60	23	16	1,098592	14	16	9	1,093458
40	120	24	15	1,130435	15	16	8	1,135922
50	180	24	15	1,130435	15	15	9	1,114286
$\mu = 1,0\%$ (фибра из троса $d_f = 1,0$ мм, $l_f = 80$ мм)								
10	9	51	27	1,181818	31	34	13	1,181818
20	30	48	30	1,130435	30	31	17	1,125
30	60	46	32	1,098592	31	26	21	1,093458
40	120	48	30	1,130435	32	27	19	1,125
50	180	47	31	1,114286	31	30	17	1,135922
50	180	71	46	1,119617	45	45	27	1,114286
$\mu = 1,5\%$ (фибра из троса $d_f = 1,0$ мм, $l_f = 80$ мм)								
10	10	78	39	1,2	49	49	19	1,206186
20	60	85	32	1,292818	55	47	15	1,295203
30	90	78	39	1,2	53	39	25	1,189831
40	120	71	46	1,119617	49	39	29	1,128617
50	180	65	48	1,134	45	38	27	1,114566

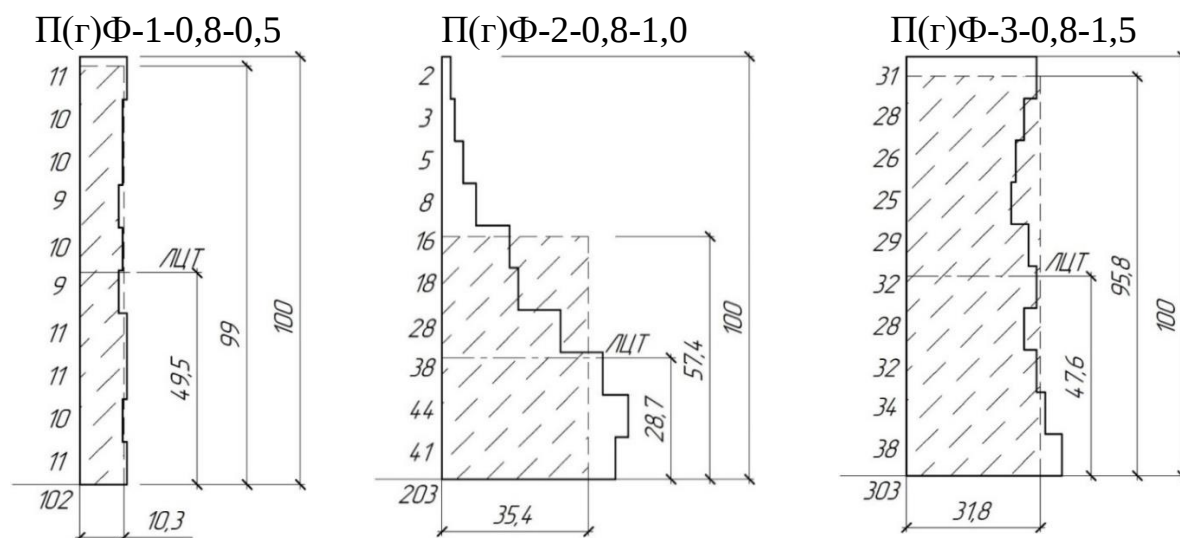
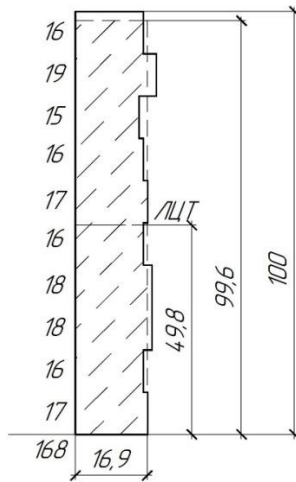


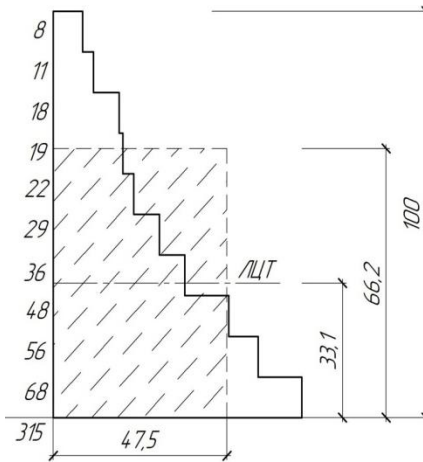
Рисунок Д.1 – Распределение фибр из прямой фибры, изготовленной с использованием волочения

Продолжение приложения Д

П(в)Ф-1-0,63-0,5



П(в)Ф-2-0,63-1,0



П(в)Ф-3-0,63-1,5

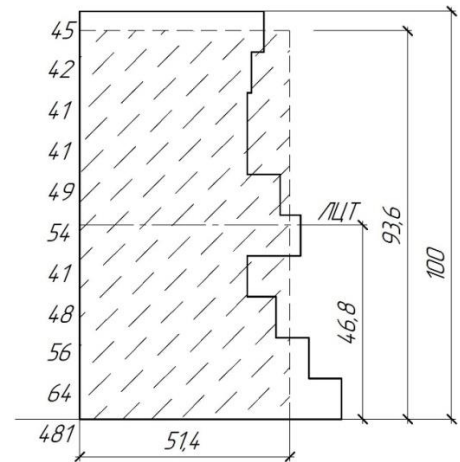
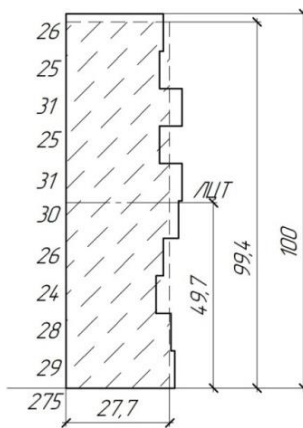
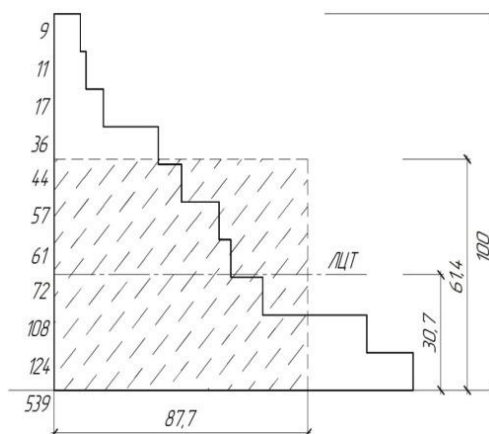


Рисунок Д.2 – Распределение фибр из волнистой фибры, изготовленной с использованием специального станка

ЛФ-1-0,49-0,5



ЛФ-2-0,49-1,0



ЛФ-3-0,49-1,5

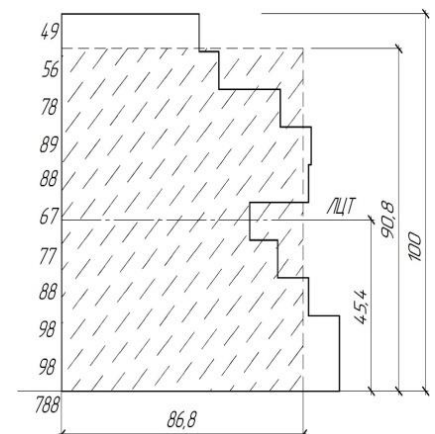


Рисунок Д.3 – Распределение фибр прямоугольного сечения из листовой стали

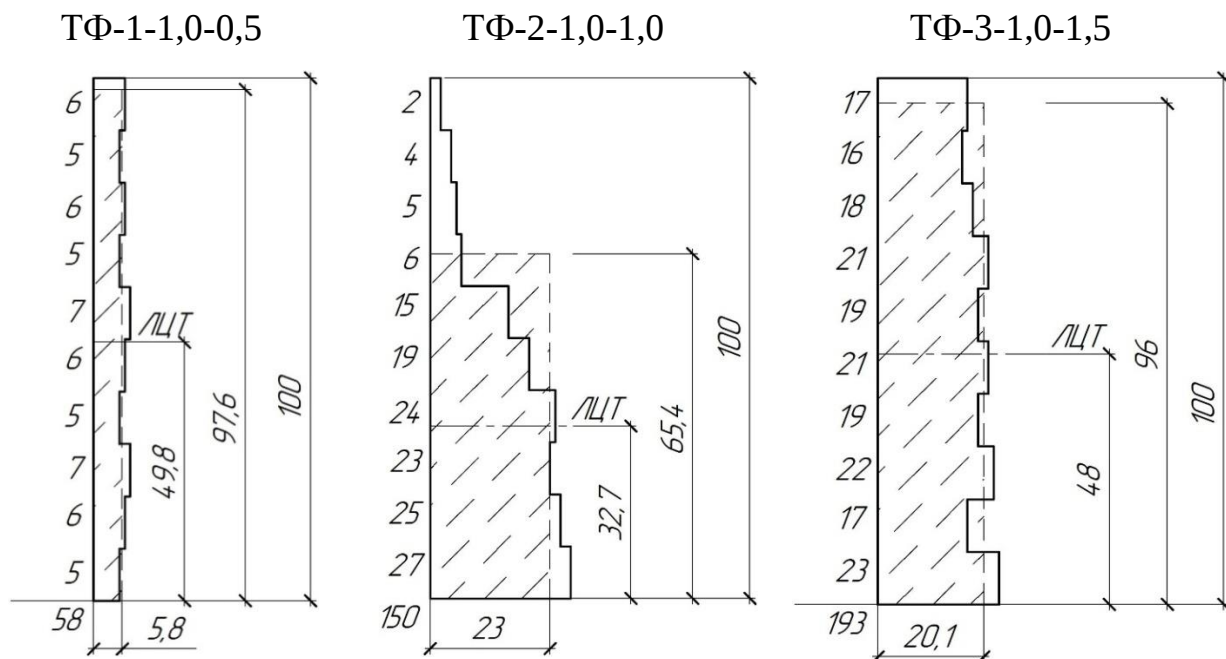


Рисунок Д.4 – Распределение стальных фибр из отработанных тросов

Таблица Д.2 – Коэффициенты расслоения фибробетонной смеси по результатам распилов

Марка образца	Время вибрации, сек	Размеры фибр (d_f/l_f), мм/мм	μ_{fv}	k_{st}
Фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки по ГОСТ 3282-744 ($R_{sf} = 700$ МПа)				
П(г)Ф-1-0,8-0,5	6	0,8/97	0,005	1,010
П(г)Ф-2-0,8-1,0	110	0,8/97	0,010	1,742
П(г) Ф-3-0,8-1,5	7	0,8/97	0,015	1,051
Фибра из проволоки волнистого очертания ($R_{sf} = 680$ МПа)				
П(в)Ф-1-0,63-0,5	8	0,63/70	0,005	1,005
П(в)Ф-2-0,63-1,0	55	0,63/70	0,010	1,509
П(в)Ф-3-0,63-1,5	10	0,63/70	0,015	1,069
Фибра из листа прямоугольного сечения ($R_{sf} = 450$ МПа)				
ЛФ-1-0,49-0,5	10	0,49/44	0,005	1,005
ЛФ-2-0,49-1,0	130	0,49/44	0,010	1,627
ЛФ-3-0,49-1,5	14	0,49/44	0,015	1,102
Фибра из троса волнистого очертания ($R_{sf} = 1200$ МПа)				
ТФ-1-1,0-0,5	4	1,0/80	0,005	1,003
ТФ-2-1,0-1,0	40	1,0/80	0,010	1,531
ТФ-3-1,0-1,5	5	1,0/80	0,015	1,012

Продолжение приложения Д

Таблица Д.3 – Сравнения опытных и расчетных значений степени расслаиваемости фибр (k_{st}) фибробетонной смеси

Ж, сек	t_{exp} , сек	Значения k_{st}			$\frac{k_{st}^{опыт} - k_{st}^{расч}}{k_{st}^{опыт}} \cdot 100$	
		Опытные значения при контроле		Расчетные значения	при $k_{st}^{опыт} = k_{st(2)}$	при $k_{st}^{опыт} = k_{st(3)}$
		2 слоя $k_{st(2)}$	3 слоя $k_{st(3)}$	$k_{st}^{расч}$	%	%
1	2	3	4	5	6	7
проволока гладкая $d_f = 0,8 \text{ мм}$, $l_f = 97 \text{ мм}$						
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$						
10	8	1,099	1,093	1,097	0,13	-0,33
20	30	1,068	1,073	1,081	-1,24	-0,78
30	60	1,04	1,054	1,053	-1,33	0,027
40	150	1,130	1,114	1,134	-0,38	-1,84
50	240	1,130	1,135	1,140	-0,882	-0,39
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,0\%$						
10	6	1,012	1,017	1,028	-1,56	-1,12
20	30	1,068	1,083	1,081	-1,24	0,14
30	90	1,147	1,158	1,150	-0,26	0,71
40	180	1,181	1,17	1,178	0,31	-0,69
50	300	1,2	1,193	1,193	0,541	0,03
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,5\%$						
10	16	1,251	1,249	1,261	-0,83	-1,01
20	60	1,251	1,249	1,246	0,393	0,21
30	80	1,119	1,128	1,122	-0,22	0,57
40	180	1,187	1,173	1,178	0,81	-0,35
50	300	1,2	1,189	1,193	0,54	-0,30
проволока волнистая $d_f = 0,63 \text{ мм}$, $l_f = 70 \text{ мм}$						
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$						
10	11	1,098	1,114	1,116	-1,58	-0,15
20	30	1,012	1,035	1,025	-1,19	0,99

Продолжение таблицы Д.3

1	2	3	4	5	6	7
30	90	1,098	1,093	1,093	0,47	0,00
40	180	1,130	1,114	1,121	0,80	-0,63
50	300	1,130	1,135	1,136	-0,55	-0,06
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,0\%$						
10	8	1,026	1,026	1,040	-1,372	-1,37
20	30	1,026	1,026	1,025	0,120	0,12
30	120	1,147	1,17	1,161	-1,278	0,70
40	240	1,181	1,181	1,189	-0,666	-0,66
50	360	1,181	1,181	1,180	0,153	0,15
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,5\%$						
10	17	1,212	1,249	1,219	-0,57	0,29
20	60	1,2	1,249	1,189	0,85	0,68
30	95	1,098	1,128	1,106	-0,69	0,72
40	210	1,152	1,173	1,157	-0,45	0,03
50	300	1,130	1,189	1,136	-0,55	0,57
фибра из листа $d_f = 0,49$ мм, $l_f = 44$ мм						
Объемный процент армирования $\mu_v = 0,5\%$						
10	14	1,098	1,114	1,113	-1,3	0,05
20	45	1,068	1,0733	1,061	0,6	1,09
30	90	1,04	1,035	1,033	0,6	0,16
40	180	1,06	1,054	1,061	0,6	-0,7
50	360	1,130	1,114	1,1208	0,8	-0,54
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,0\%$						
10	10	1,026	1,026	1,033	-0,7	-0,7
20	40	1,026	1,044	1,033	-0,7	1,04
30	120	1,098	1,093	1,102	-0,3	-0,7
40	240	1,130	1,125	1,130	0,03	-0,4
50	360	1,114	1,135	1,120	-0,5	1,37
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,5\%$						
10	20	1,187	1,206	1,198	-0,8	0,6

Продолжение таблицы Д.3

1	2	3	4	5	6	7
20	70	1,152	1,1584	1,166	-1,2	-0,7
30	120	1,109	1,114	1,102	0,6	1,0
40	210	1,109	1,100	1,098	0,9	0,18
50	320	1,098	1,107	1,092	0,5	1,3
фибра из троса $d_f=1,0$ мм, $l_f=80$ мм						
Объемный процент армирования $\mu_{fv}=0,5\%$						
10	7	1,130	1,114	1,118	1,06	-0,37
20	30	1,130	1,135	1,134	-0,38	0,09
30	60	1,098	1,093	1,106	-0,75	-1,22
40	120	1,130	1,135	1,134	-0,38	0,097
50	180	1,130	1,114	1,125	0,47	-0,97
Объемный процент армирования $\mu_{fv}=1,0\%$						
10	9	1,181	1,181	1,178	0,31	0,3
20	30	1,130	1,125	1,134	-0,38	-0,87
30	60	1,098	1,093	1,106	-0,75	-1,22
40	120	1,130	1,125	1,134	-0,38	-0,87
50	180	1,114	1,135	1,125	-0,97	0,95
Объемный процент армирования $\mu_{fv}=1,5\%$						
10	10	1,2	1,206	1,203	-0,26	0,25
20	60	1,292	1,295	1,299434	-0,5	-0,3
30	90	1,2	1,189	1,203136	-0,26	-1,1
40	120	1,119	1,128	1,134812	-1,35	-0,5
50	180	1,119	1,114	1,125116	-0,49	-0,97
фибра «Драмикс» $d_f=0,75$ мм, $l_f=60$ мм						
Объемный процент армирования $\mu_{fv}=0,5\%$						
10	9	1,098	1,114	1,109	-1,0	0,43
20	30	1,068	1,073	1,066	0,18	0,6
30	60	1,04	1,035	1,038	0,1	-0,38
40	120	1,068	1,073	1,066	0,18	0,64

Продолжение таблицы Д.3

1	2	3	4	5	6	7
50	180	1,068	1,054	1,056	1,09	-0,25
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,0\%$						
10	11	1,147	1,158	1,157	-0,9	0,08
20	30	1,083	1,063	1,066	1,5	-0,26
30	60	1,04	1,044	1,038	0,14	0,58
40	120	1,054	1,054	1,066	-1,17	-1,17
50	180	1,054	1,054	1,056	-0,25	-0,25
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,5\%$						
10	10	1,141	1,135	1,134	0,58	0,09
20	60	1,225	1,222	1,231	-0,48	-0,66
30	90	1,141	1,128	1,134	0,58	-0,54
40	120	1,078	1,066	1,066	1,099	0,035
50	210	1,088	1,100	1,093	-0,46	0,62

Таблица Д.4 – Сравнения времени вибрирования фибробетонной смеси (t_{exp}) с расчетным

Ж, сек	Время вибрирования фибробетонной смеси, сек			$\frac{t_{exp} - t_n^{расч}}{t_{exp}} \cdot 100\%$	
	Опытные значения	Расчетные значения при различном контроле		при $t_n^{расч} = t_2^{расч}$	при $t_n^{расч} = t_3^{расч}$
		2 слоя $t_2^{расч}$	3 слоя $t_3^{расч}$		
1	2	3	4	5	6
проволока гладкая $d_f=0,8\text{мм}$, $l_f=97\text{ мм}$					
Объемный процент армирования $\mu_v=0,5\%$					
10	8	8,1	7,96	-1,30	0,85
20	30	28,5	29,16	4,77	2,793
30	60	57,02	60,49	4,95	-0,82
40	150	148,2	138,50	1,18	7,66
50	240	231,6	237,0	3,49	1,24

Продолжение таблицы Д.4

1	2	3	4	5	6
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,0\%$					
10	6	5,6	5,7	5,71	3,95
20	30	28,5	30,4	4,77	-1,35
30	90	89,4	93,7	0,66	-4,19
40	180	183,9	175,0	-2,18	2,76
50	300	310,1	302,3	-3,39	-0,77
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,5\%$					
10	16	15,3	15,2	3,79	4,68
20	60	61,5	60,9	-2,62	-1,66
30	80	79,6	82,7	0,40	-3,42
40	180	188,6	177,9	-4,78	1,15
50	300	310,1	297,2	-3,39	0,92
проволока волнистая $d_f = 0,63\text{мм}$, $l_f = 70\text{ мм}$					
Объемный процент армирования $\mu_v = 0,5\%$					
10	11	10,2	10,9	6,4	0,069
20	30	28,7	31,5	4,2	-5,22
30	90	92,6	90,6	-2,9	-0,71
40	180	188,2	175,8	-4,5	2,28
50	300	294,0	300,9	1,9	-0,31
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,0\%$					
10	8	7,5	7,5	5,03	5,03
20	30	30,3	30,3	-1,2	-1,29
30	120	113,5	125,0	5,3	-4,17
40	240	233,5	233,5	2,6	2,68
50	360	364,9	364,9	-1,3	-1,37
Объемный процент армирования $\mu_v = 1,5\%$					
10	17	16,6	17,3	2,3	-2,07
20	60	63,0	62,4	-5,0	-4,13
30	95	92,6	98,9	2,5	-4,13

Продолжение таблицы Д.4

1	2	3	4	5	6
40	210	206,6	211,6	1,5	-0,80
50	300	294,0	310,4	1,9	-3,48
фибра из листа $d_f = 0,49\text{мм}$, $l_f = 44\text{ мм}$					
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$					
10	14	13,2	14,1	5,4	-0,95
20	45	46,6	47,6	-3,6	-5,8
30	90	93,1	91,3	-3,4	-1,47
40	180	186,5	175,5	-3,6	2,45
50	360	378,1	353,3	-5,03	1,85
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,0\%$					
10	10	9,7	9,7	2,3	2,3
20	40	39,06	42,1	2,3	-5,4
30	120	119,0	116,5	0,7	2,8
40	240	241,99	236,5	-0,8	1,4
50	360	353,3	386,9	1,8	-7,4
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,5\%$					
10	20	19,2	20,7	3,7	-3,9
20	70	66,4	68,0	5,09	2,7
30	120	124,4	127,1	-3,6	-5,99
40	210	221,1	213,2	-5,3	-1,5
50	320	330,7	343,0	-3,3	-7,2
фибра из троса $d_f = 1,0\text{ мм}$, $l_f = 80\text{ мм}$					
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$					
10	7	7,4	6,9	-5,8	1,06
20	30	29,6	30,3	1,18	-1,12
30	60	58,3	57,1	2,74	4,82
40	120	118,5	121,3	1,18	-1,12
50	180	185,2	173,1	-2,93	3,8

Продолжение таблицы Д.4

1	2	3	4	5	6
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,0\%$					
10	9	9,1	9,1	-2,18	-2,18
20	30	29,6	28,9	1,18	3,4
30	60	58,3	57,1	2,74	4,8
40	120	118,5	115,9	1,18	3,4
50	180	173,1	189,6	3,81	-5,3
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,5\%$					
10	10	9,9	10,1	0,7	-1,8
20	60	58,6	59,2	2,2	1,2
30	90	89,3	85,5	0,7	4,8
40	120	113,3	117,6	5,5	1,9
50	180	177,0	173,1	1,63	3,8
фибра «Драмикс» $d_f = 0,75$ мм, $l_f = 60$ мм					
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$					
10	9	8,6	9,2	3,9	-2,59
20	30	30,4	31,1	-1,57	-3,68
30	60	60,8	59,6	-1,38	0,55
40	120	121,8	124,4	-1,57	-3,68
50	180	190,4	179,2	-5,8	0,4
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,0\%$					
10	11	10,5	11,1	3,67	-1,03
20	30	32,4	29,8	-8,1	0,47
30	60	60,8	62,0	-1,38	-3,37
40	120	114,7	114,7	4,4	4,4
50	180	179,2	179,2	0,41	0,41
Объемный процент армирования $\mu_{fv} = 1,5\%$					
10	10	10,3	10,1	-3,5	-1,12
20	60	58,8	58,3	1,94	2,8
30	90	93,1	88,2	-3,5	1,9
40	120	127,0	121,0	-5,8	-0,88
50	210	207,0	217,6	1,4	-3,6

Таблица Д.5 – Сравнения опытных (по распилам) и расчетных значений степени расслаиваемости фибр (k_{st}) фибробетонной смеси в образцах, подверженных испытаниям на изгиб

Марка образца	Степень расслаиваемости (k_{st})		$\frac{k_{st}^{опыт} - k_{st}^{расч}}{k_{st}^{опыт}} \cdot 100$
	$k_{st}^{опыт}$	$k_{st}^{расч}$	
Фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки по ГОСТ 3282-744 ($d_f = 0,8$ мм), серия П(г)Ф			
1-0,8-0,5	1,01	1,028818	-1,86
2-0,8-1,0	1,742	1,71964	1,28
3-0,8-1,5	1,051	1,065429	-1,37
Фибра из проволоки волнистого очертания ($d_f = 0,63$ мм), серия П(в)Ф			
1-0,63-0,5	1,005	1,040406	-3,52
2-0,63-1,0	1,509	1,49828	0,71
3-0,63-1,5	1,069	1,093403	-2,28
Фибра из листа прямоугольного сечения ($d_f = 0,49$ мм), серия ЛФ			
1-0,49-0,5	1,005	1,033715	-2,85
2-0,49-1,0	1,627	1,642891	-0,97
3-0,49-1,5	1,102	1,113628	-1,05
Фибра из троса волнистого очертания ($d_f = 1,0$ мм), серия ТФ			
1-1,0-0,5	1,003	0,985517	1,74
2-1,0-1,0	1,531	1,532381	-0,09
3-1,0-1,5	1,012	1,038514	-2,61
Фибра рубленная из стальной проволоки (аналог фибры «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт») ($d_f = 0,75$ мм), серия ДФ			
1-0,75-0,5	1,019	1,050101	-3,05
2-0,75-0,5	1,831	1,821275	0,53
3-0,75-0,5	1,042	1,081815	-3,82

Таблица Д.6 - Сравнения опытных (по распилам) и расчетных значений времени вибрирования фибробетонной смеси с расчетным в образцах, подверженных испытаниям на изгиб

Марка образца	Степень расслаиваемости (k_{st})		$\frac{t_{exp} - t_n^{расч}}{t_{exp}} \cdot 100\%$
	t_{exp}	$t_n^{расч}$	
Фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки по ГОСТ 3282-744 ($d_f= 0,8$ мм), серия П(г)Ф			
1-0,8-0,5	6	5,586281	6,89
2-0,8-1,0	110	120,8698	-9,88
3-0,8-1,5	7	6,636029	5,19
Фибра из проволоки волнистого очертания ($d_f= 0,63$ мм), серия П(в)Ф			
1-0,63-0,5	8	6,946276	-3,52
2-0,63-1,0	55	57,68549	0,71
3-0,63-1,5	10	9,088462	-2,28
Фибра из листа прямоугольного сечения ($d_f= 0,49$ мм), серия ЛФ			
1-0,49-0,5	10	8,930926	10,69
2-0,49-1,0	130	121,744	6,35
3-0,49-1,5	14	13,42233	4,12
Фибра из троса волнистого очертания ($d_f= 1,0$ мм), серия ТФ			
1-1,0-0,5	4	4,339548	-8,488699
2-1,0-1,0	40	39,85988	0,3503118
3-1,0-1,5	5	4,506723	9,8655486
Фибра рубленная из стальной проволоки (аналог фибры «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт») ($d_f= 0,75$ мм), серия ДФ			
1-0,75-0,5	7	6,18825	11,59
2-0,75-0,5	180	187,3638	-4,09
3-0,75-0,5	8	6,81586	14,8

Характеристики сцепления фибры с бетоном- матрицей

Таблица Е.1 – Экспериментальные значения характеристик сцепления

Прочность бетона, R_b	$\frac{l_{f,z}}{d_f}$	Усилие вырыва, P	$\eta_{f,exp}$	$\frac{\eta_{f,exp} - \eta_{f,расч}}{\eta_{f,расч}} \cdot 100\%$
МПа	-	Н	-	%
1	2	3	4	5
фибры прямые из стальной низкоуглеродистой проволоки ($A_f = 0,5024 \text{ мм}^2$)				
29,5	12,5	86	2,15	-6,33974
31,4	12,5	92	2,14	-6,80907
28,9	12,5	82	2,21	-3,76882
29,5	25	154	2,40	4,607566
31,4	25	165	2,39	3,922003
28,9	25	150	2,41	5,212754
29,5	37,5	235	2,36	2,827012
31,4	37,5	263	2,24	-2,20268
28,9	37,5	248	2,19	-4,54488
фибры из стальной низкоуглеродистой проволоки волнистого очертания ($A_f = 0,312 \text{ мм}^2$)				
29,5	15,8	260	0,56	-6,47933
31,4	15,8	245	0,63	5,638571
28,9	15,8	245	0,58	-2,77214
29,5	31,7	460	0,63	5,719022
31,4	31,7	495	0,62	4,571515
28,9	31,7	505	0,56	-5,6601
29,5	47,6	690	0,63	5,719022
31,4	47,6	735	0,63	5,638571
28,9	47,619	760	0,56	-5,97043

Продолжение таблицы Е.1

1	2	3	4	5
фибры из листа прямоугольного сечения ($A_f = 0,188\text{мм}^2$)				
29,5	20,4	170	0,66	-4,64559
31,4	20,4	165	0,73	4,571515
28,9	20,4	155	0,71	2,455161
29,5	40,8	320	0,70	1,314063
31,4	40,8	350	0,69	-1,404
28,9	40,8	340	0,65	-6,585
29,5	61,2	510	0,66	-4,64559
31,4	61,2	520	0,69	-0,45596
28,9	61,2	450	0,74	5,870333
фибры из троса волнистого очертания ($A_f = 0,785\text{мм}^2$)				
29,5	10	130	1,78	-1,03632
31,4	10	140	1,76	-2,18651
28,9	10	130	1,74	-3,04915
29,5	20	250	1,85	2,922222
31,4	20	260	1,89	5,337607
28,9	20	240	1,89	5,030093
29,5	30	410	1,69	-5,86382
31,4	30	400	1,84	2,704167
28,9	30	390	1,74	-3,04915

Примечание. Расчетные значения характеристик сцепления фибр:

- прямой - $\eta_{f,расч} = 2,3$;
- из листа - $\eta_{f,расч} = 0,7$;
- волнистой - $\eta_{f,расч} = 0,6$;
- из троса - $\eta_{f,расч} = 1,8$.

Сравнение опытных и расчетных значений прочности СФШБ

Таблица Ж.1 – Опытные значения величины бокового обжатия бетона

l_f	d_f	$l_{f,an}$	R_f	η_f	μ	R_b	Ориентация фибр	
							Плоскостная ($k_s = 0,407$)	Трехосная ($k_s = 0,069$)
							σ_0	σ_0
мм	мм	мм	МПа	-	-	МПа	МПа	МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки								
97	0,8	43,04	690	2,3	0,005	29,5	0,791275	0,134461
97	0,8	43,04	690	2,3	0,01	29,5	1,582549	0,268923
97	0,8	43,04	690	2,3	0,015	29,5	2,373824	0,403384
97	0,8	40,43	690	2,3	0,005	31,4	0,842238	0,143122
97	0,8	40,43	690	2,3	0,01	31,4	1,684476	0,286243
97	0,8	40,43	690	2,3	0,015	31,4	2,526715	0,429365
97	0,8	43,93	690	2,3	0,005	28,9	0,775181	0,131727
97	0,8	43,93	690	2,3	0,01	28,9	1,550362	0,263453
97	0,8	43,93	690	2,3	0,015	28,9	2,325543	0,39518
фибры из стальной низкоуглеродистой проволоки волнистого очертания								
70	0,63	8,71	680	0,6	0,005	29,5	0,346144	0,346144
70	0,63	8,71	680	0,6	0,01	29,5	0,692287	0,692287
70	0,63	8,71	680	0,6	0,015	29,5	1,038431	1,038431
70	0,63	8,19	680	0,6	0,005	31,4	0,346144	0,346144
70	0,63	8,19	680	0,6	0,01	31,4	0,692287	0,692287
70	0,63	8,19	680	0,6	0,015	31,4	1,038431	1,038431
70	0,63	8,89	680	0,6	0,005	28,9	0,346144	0,346144
70	0,63	8,89	680	0,6	0,01	28,9	0,692287	0,692287
70	0,63	8,89	680	0,6	0,015	28,9	1,038431	1,038431
фибры из листа прямоугольного сечения								
44	0,49	6,15	529	0,7	0,005	29,5	0,378748	0,378748

Продолжение таблицы Ж.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
44	0,49	6,15	529	0,7	0,01	29,5	0,757497	0,757497
44	0,49	6,15	529	0,7	0,015	29,5	1,136245	1,136245
44	0,49	5,78	529	0,7	0,005	31,4	0,378748	0,378748
44	0,49	5,78	529	0,7	0,01	31,4	0,757497	0,757497
44	0,49	5,78	529	0,7	0,015	31,4	1,136245	1,136245
44	0,49	6,28	529	0,7	0,005	28,9	0,378748	0,378748
44	0,49	6,28	529	0,7	0,01	28,9	0,757497	0,757497
44	0,49	6,28	529	0,7	0,015	28,9	1,136245	1,136245
фибры из троса волнистого очертания								
80	1,0	73,27	1200	1,8	0,005	29,5	0,6671	0,16056
80	1,0	73,27	1200	1,8	0,01	29,5	1,3342	0,321121
80	1,0	73,27	1200	1,8	0,015	29,5	2,0013	0,481681
80	1,0	68,79	1200	1,8	0,005	31,4	0,710066	0,170901
80	1,0	68,79	1200	1,8	0,01	31,4	1,420131	0,341803
80	1,0	68,79	1200	1,8	0,015	31,4	2,130197	0,512704
80	1,0	74,74	1200	1,8	0,005	28,9	0,653532	0,157295
80	1,0	74,74	1200	1,8	0,01	28,9	1,307064	0,314589
80	1,0	74,74	1200	1,8	0,015	28,9	1,960595	0,471884
Фибра «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт»								
60	0,75	25,17	1100	0,9	0,005	29,5	1,3342	0,44389
60	0,75	25,17	1100	0,9	0,01	29,5	2,6684	0,88778
60	0,75	25,17	1100	0,9	0,015	29,5	4,002599	1,331669
60	0,75	23,65	1100	0,9	0,005	31,4	1,420131	0,472479
60	0,75	23,65	1100	0,9	0,01	31,4	2,840263	0,944959
60	0,75	23,65	1100	0,9	0,015	31,4	4,260394	1,417438
60	0,75	25,69	1100	0,9	0,005	28,9	1,307064	0,434862
60	0,75	25,69	1100	0,9	0,01	28,9	2,614127	0,869723
60	0,75	25,69	1100	0,9	0,015	28,9	3,921191	1,304585

Таблица Ж.2 – Сравнение опытных и расчетных значений прочности СФШБ при сжатии

μ_{fv}	Опытные значения, МПа		Расчетные значения, МПа		Отклонения, %%	
					$\frac{R_{fb,exp} - R_{fb,расч}}{R_{fb,exp}} \cdot 100\%$	
	R _{fb,exp(2)}	R _{fb,exp(3)}	R _{fb,расч(2)}	R _{fb,расч(3)}	R _{fb(2)}	R _{fb(3)}
1	2	3	4	5	6	7
фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки						
Прочность матрицы (R _{b,exp} = 29,5 МПа)						
0,005	33,8	30,7	33,14839	30,13859	1,927836	1,828682
0,01	35,1	31,2	36,58763	30,76883	-4,23825	1,381949
0,015	38,5	31,5	39,87881	31,39132	-3,58132	0,345004
Прочность матрицы (R _{b,exp} = 31,4 МПа)						
0,005	34,8	33,7	35,30078	32,08285	-1,43902	4,798664
0,01	38,1	34,8	38,9773	32,75673	-2,30263	5,87148
0,015	40,5	36,1	42,49534	33,42229	-4,92676	7,417491
Прочность матрицы (R _{b,exp} = 28,9 МПа)						
0,005	33,8	30,5	32,46886	29,52465	3,938298	3,197872
0,01	35,1	31,7	35,8333	30,14114	-2,08919	4,917555
0,015	37,6	32,4	39,05299	30,75005	-3,86434	5,092424
фибры из стальной низкоуглеродистой проволоки волнистого очертания						
Прочность матрицы (R _{b,exp} = 29,5 МПа)						
0,005	33,2	31,2	34,99707	31,12724	-5,41287	0,233209
0,01	36,8	32,4	40,08088	32,70508	-8,91543	-0,94159
0,015	40,1	33,1	44,90565	34,24157	-11,9842	-3,44885
Прочность матрицы (R _{b,exp} = 31,4 МПа)						
0,005	34,3	33,2	36,93638	33,03626	-7,68623	0,493198
0,01	39,1	35,1	42,07068	34,6252	-7,59764	1,352694
0,015	42,5	37,2	46,94853	36,17422	-10,4671	2,757473
Прочность матрицы (R _{b,exp} = 28,9 МПа)						
0,005	32,6	31,4	34,38396	30,52423	-5,47227	2,789076

Продолжение таблицы Ж.2

1	2	3	4	5	6	7
0,01	36,5	33,2	39,451	32,09836	-8,08492	3,3182
0,015	39,8	34,6	44,25823	33,63067	-11,2016	2,801525
фибры из листа прямоугольного сечения						
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 29,5$ МПа)						
0,005	32,1	30,7	33,7472	31,27783	-5,13145	-1,88217
0,01	35,6	32,6	37,72386	32,99748	-5,96589	-1,21928
0,015	38,1	33,7	41,51691	34,66915	-8,96827	-2,8758
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 31,4$ МПа)						
0,005	34,2	33,1	35,67566	33,18782	-4,3148	-0,2653
0,01	36,5	34,7	39,68924	34,91988	-8,73763	-0,63366
0,015	39,8	35,2	43,52217	36,60553	-9,35219	-3,99297
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 28,9$ МПа)						
0,005	31,7	30,6	33,1377	30,67449	-4,53532	-0,24344
0,01	34,5	32,1	37,10208	32,39001	-7,54225	-0,90346
0,015	37,2	33,1	40,88191	34,05701	-9,89761	-2,89126
фибры из троса волнистого очертания						
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 29,5$ МПа)						
0,005	33,6	31,6	32,59174	30,26156	3,000767	4,235578
0,01	37,2	33,8	35,52638	31,01137	4,498987	8,250379
0,015	39,4	33,9	38,34506	31,75045	2,677523	6,340852
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 31,4$ МПа)						
0,005	36,8	35,1	34,70568	32,21433	5,691084	8,221283
0,01	40,1	35,7	37,84287	33,01605	5,628753	7,518069
0,015	42,2	36,5	40,85588	33,80625	3,185121	7,380146
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 28,9$ МПа)						
0,005	33,1	31,1	31,92432	29,64493	3,551893	4,678688
0,01	37,6	32,1	34,79512	30,37839	7,459784	5,363284
0,015	39,2	33,4	37,55255	31,10136	4,202673	6,882168

Продолжение таблицы Ж.2

1	2	3	4	5	6	7
Фибра «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт»						
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 29,5$ МПа)						
0,005	34,1	32,2	35,37734	31,52461	-3,74585	2,097497
0,01	38,1	33,3	40,79475	33,47542	-7,07283	-0,52679
0,015	42,1	36,4	45,93026	35,3667	-9,098	2,838727
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 31,4$ МПа)						
0,005	35,4	34,2	37,32009	33,43623	-5,424	2,23325
0,01	39,2	36,2	42,79219	35,40164	-9,16375	2,205403
0,015	44,1	38,1	47,98472	37,30937	-8,80888	2,075157
Прочность матрицы ($R_{b,exp} = 28,9$ МПа)						
0,005	33,6	31,7	34,76307	30,92073	-3,46153	2,458272
0,01	36,8	33,5	40,16234	32,86667	-9,13679	1,890543
0,015	42,2	35,2	45,27901	34,75247	-7,29624	1,271383

Примечания: $R_{fb,exp(2)}$, $R_{fb,расч(2)}$ – опытные и расчетные значения прочности при плоскостной ориентации фибр; $R_{fb,exp(3)}$, $R_{fb,расч(3)}$ – опытные и расчетные значения прочности при трехосной ориентации фибр.

Таблица Ж.3 – Сравнение опытных и расчетных значений прочности СФШБ при растяжении

μ_{fv}	Опытные значения, МПа	Расчетные значения, МПа		Отклонения, %% $\frac{R_{fbt,exp} - R_{fbt,расч}}{R_{fbt,exp}} \cdot 100\%$	
		По (4.46)	По (4.47)	По (4.46)	По (4.47)
		$R_{fbt(1),расч}$	$R_{fbt(2),расч}$		
1	2	3	4	5	6
фибра прямая из стальной низкоуглеродистой проволоки					
0	1,8	1,77	1,88	1,666666667	-4,44444
0,005	2,3	2,22	2,2	3,47826087	4,347826
0,01	2,9	2,83	2,74	2,413793103	5,517241

Продолжение таблицы Ж.3

1	2	3	4	5	6
0,015	3,1	3,03	3	2,258064516	3,225806
фибры из стальной низкоуглеродистой проволоки волнистого очертания					
0	1,9	1,8	1,8	5,263157895	5,263158
0,5	3,41	5,63	3,33	-65,1026393	2,346041
1	4,64	9,58	4,82	-106,465517	-3,87931
1,5	6,34	12,56	6,21	-98,1072555	2,050473
фибры из листа прямоугольного сечения					
0	1,8	1,77	1,88	1,666666667	-4,44444
0,5	2,51	3,7	2,6	-47,4103586	-3,58566
1	3,65	5,92	3,51	-62,1917808	3,835616
1,5	4,17	7,15	4,12	-71,4628297	1,199041
фибры из троса волнистого очертания					
0	1,8	1,77	1,88	1,666666667	-4,44444
0,5	2,2	2,1	1,45	4,545454545	34,09091
1	2,9	2,79	1,45	3,793103448	50
1,5	2,95	2,81	0,5	4,745762712	83,05085
фибра «Драмикс» Бельгийской фирмы «Бекарт»					
0	1,8	1,77	1,88	1,666666667	-4,44444
0,5	3,16	3,18	3,14	-0,63291139	0,632911
1	4,8	4,88	4,73	-1,666666667	1,458333
1,5	5,95	5,92	5,81	0,504201681	2,352941

Технический акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ЛИТЦ»

А.В. Копейкин



«16» ноября 2022 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы ниже подписавшиеся, комиссия в составе:

- от Липецкого государственного технического университета – декан инженерно-строительного факультета, к.т.н., доцент Борков П.В., заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и дорожные технологии» д.т.н., проф. Гончарова М.А., д.т.н., проф. Бондарев Б.А.;

- от ООО «ЛИТЦ» - главный инженер проекта Фролов А.И., составила настоящий акт о том, что в результате выполнения научно-исследовательских работ в период с 2020 по 2022 г.г., под руководством ответственного исполнителя проф. Бондарева Б.А., составы сталефибробетона на основе отходов местных производств были внедрены при реконструкции мостового перехода через реку Птань на км 0+700 автомобильной дороги Плахово - примыкание к автомобильной дороге Авдулово-Воскресенское в Данковском районе Липецкой области.

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»

ООО «ЛИТЦ»

Заведующий кафедрой

«Строительное материаловедение и
дорожные технологии»

д.т.н., проф. _____ Гончарова М.А.

Д.т.н., проф. _____ Бондарев Б.А.

К.т.н., доцент _____ Борков П.В.

Директор

Копейкин А.В.

Главный инженер проекта

Фролов А.И.



**Титульный лист технологического регламента по технологии производства
сталефиброшлакобетона и конструкций из него**

МУ «УПРАВЛЕНИЕ ГЛАВНОГО СМОТРИТЕЛЯ ГОРОДА ЛИПЕЦКА»
ФГБОУ ВО «ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Липецкий
государственный технический
университет»



____ А.В.Егоров

« 30 » сентября 2024
года

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник МУ «Управления
главного смотрителя города
Липецка»



____ В.Ю.Лесных

« 02 » декабря 2024 года

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ
ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
СТАЛЕФИБРОШЛАКОБЕТОНА И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕГО**

Разработано:

Д.т.н., профессор Бондарев Б.А.

Ассистент Стурова В.А.

Липецк, 2024

Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Липецкий
государственный технический
университет», д.ф.н., доцент
И.П. Полякова



« 15 » 01 2025г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство» образовательной программы «Автомобильные дороги»; магистров направления 08.04.01 – «Строительство», образовательной программы «Строительные технологии с использованием эффективных материалов».

Заведующий кафедрой
строительного материаловедения и
дорожных технологий,
д.т.н., профессор

М.А. Гончарова

Титульные листы объектов интеллектуальной собственности





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021664189

**«Автоматизированный расчет геометрических
характеристик нормальных сечений изгибаемых
комбинированно армированных композитов при
деградационных процессах»**

Правообладатели: **Черноусов Николай Николаевич (RU), Стурова
Виктория Андреевна (RU), Ливенцева Алена Андреевна (RU)**

Авторы: **Черноусов Николай Николаевич (RU), Стурова
Виктория Андреевна (RU), Ливенцева Алена Андреевна (RU)**

Заявка № 2021663370

Дата поступления 25 августа 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 01 сентября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024662548

«Подбор состава сталефиброшлакобетона с заданными
физико-механическими характеристиками»

Правообладатель: *Стурова Виктория Андреевна (RU)*Авторы: *Стурова Виктория Андреевна (RU), Ливенцева
Алена Андреевна (RU)*

Заявка № 2024618839

Дата поступления 23 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов