

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленное, гражданское строительство и городское
хозяйство»

(наименование кафедры)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Технология строительного производства»

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: «Исследование состава высокопрочного бетона из отходов стекла и
совершенствование технологии его приготовления»

Студент

М.В. Иванко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

В.Н. Шишканова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

В.А. Ерышев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.э.н., к.т.н., профессор, А.А. Руденко

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

« ____ » _____ 20 ____ г.

Допустить к защите

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

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

« ____ » _____ 20 ____ г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1.1 Экологические и экономические аспекты ресурсопользования	8
1.2 Проблема выделения и утилизации отходов стекла из городских свалок	11
1.3 Использование стекольного боя в производстве строительных материалов	12
1.4 Роль дисперсности компонентов бетонных композиций в получении высококачественных бетонов	16
1.5 Высокопрочный бетон	21
2 Характеристики исходных материалов. Методы исследования и испытаний	23
2.1 Систематические погрешности и оценка доверительных интервалов	23
2.2 Методы исследований	24
2.2.1 Изучение свойств мелкого заполнителя	24
2.2.2 Изучение свойств крупного заполнителя	25
2.2.3 Подбор оптимального состава бетонной смеси с применением стеклобоя	26
2.2.4 Изучение свойств бетонной смеси	27
2.2.5 Определение физико-механических свойств бетонов	28
2.2.6 Методика исследования цементного камня	29
2.3 Характеристика применяемых материалов	30
2.3.1 Портландцемент	30
2.3.2 Мелкий заполнитель	33
2.3.3 Крупный заполнитель	35
2.3.4 Стеклобой.....	35
2.3.5. Наполнитель цемента	36
2.3.6 Поликарбоксилатные пластификаторы	37
3 Исследование свойств бетона с использованием стеклобоя в качестве заполнителя.....	40

3.1 Исследование влияния стекольного боя на прочностные характеристики цементного камня.....	40
3.2 Влияние активной минеральной добавки микрокремнезема и суперпластификаторов на прочностные характеристики цементного камня.	47
3.3 Применение стеклобоя в качестве заполнителя для изготовления высокопрочных бетонов	52
3.4 Исследование зоны контакта зерен стеклобоя с цементным камнем.....	56
3.4.1 Исследование цементного камня бетона партии 3.	57
3.4.2 Исследование цементного камня бетона партии 6 после пропаривания.	60
3.4.3 Исследование цементного камня бетона партии 6 после выдерживания в нормальных условиях твердения.....	62
4 Расчёт несущей способности изгибаемых элементов по деформативной модели.....	63
4.2 Теоретические предпосылки расчета железобетонных изгибающих элементов на прочность.....	64
4.3 Характеристика опытных образцов и результаты испытаний	68
4.4 Определение предельных моментов прогибов в середине пролёта	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	73
Ошибка! Закладка не определена.	
ПРИЛОЖЕНИЯ	82

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время строительная практика характеризуется расширяющимся применением высокотехнологичных бетонов нового поколения, к которым относятся плотные высокопрочные модифицированные бетоны. В условиях высокой стоимости природных сырьевых материалов особую ценность представляют научно-исследовательские работы, выявляющие новые возможности по использованию отходов в создании строительных материалов на их основе. Вопросам утилизации промышленных и бытовых отходов уделяется всё большее внимание. Этому способствует ухудшающаяся экологическая ситуация, особенно в крупных городах. Развитие направления по использованию техногенного сырья и отходов городского хозяйства в производстве высокопрочных модифицированных бетонов является перспективным и инновационным.

Настоящая магистерская диссертация направлена на обоснование возможности использования стеклобоя в качестве заполнителя бетона, исследование физико-механических свойств получаемого бетона и уточнение областей его применения при выполнении строительно-монтажных работ.

Перед выполнением настоящей научно-исследовательской работы была поставлена задача проведения комплекса экспериментально-теоретических исследований по изучению свойств стеклобоя, песка и щебня, используемых при производстве бетона в Самарской области, бетонной смеси и бетона с использованием стеклобоя в качестве заполнителя, уточнению механизма влияния стеклобоя на свойства бетона, оптимизации состава стеклобетона и определению более эффективного его использования в строительстве.

Цель исследований. Проведение комплекса экспериментально-теоретических исследований по обоснованию возможности использования стеклобоя в качестве заполнителя для производства бетона, исследование свойств получаемого бетона с использованием стеклобоя, уточнение

механизма влияния стеклобоя на свойства бетона.

Предметом исследования диссертационной работы является бетон с использованием стеклобоя в качестве заполнителя.

Объект исследования диссертационной работы – технология изготовления высокопрочного бетона с использованием отходов стекла.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать свойства бетонной смеси и бетона с использованием в качестве заполнителя стеклобоя.
2. Уточнить механизм влияния стеклобоя на свойства бетона.
3. Обосновать выбор эффективных наполнителей и комплексных химических добавок, режимов твердения бетонов с использованием стеклобоя.
4. Разработать рекомендации по производству бетонов с использованием отсевов дробления стекла в качестве мелкого заполнителя.
5. Уточнить понятие «высокопрочный бетон из отходов стекла»;
6. Произвести расчёт несущей способности изгибаемого элемента, изготовленного с применением полученного бетона.

Методы исследования.

Исследования качества песка, щебня и стеклобоя в качестве заполнителей бетона проведены в соответствии с ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия», ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ Методы физико-механических испытаний», ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия».

Подбор состава и исследование свойств бетонной смеси осуществлялось в соответствии с ГОСТ 27006-86. «Бетоны. Правила подбора

состава» и ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия» и ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Исследование свойств бетона проводилось в соответствии с ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования», ГОСТ 12730.0-78. «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости», ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Исследование контактной зоны зерна стеклобоя с цементным камнем осуществлялось с помощью электронного микроскопа.

Научная новизна диссертационной работы, заключается в следующем:

1. Уточнен категориальный аппарат в части трактовки определения «высокопрочный бетон из отходов стекла».

2. Дополнена классификация бетонов в части добавления классификационного признака «вид заполнителя».

3. Разработан состав и уточнена технология приготовления бетона с использованием стеклобоя.

4. На основании комплекса экспериментально-теоретических исследований бетона установлены закономерности влияния количества стеклобоя на свойства цементного камня.

Практическая значимость работ заключается в получении бетонов с улучшенными характеристиками с использованием отходов городского хозяйства, что позволит повысить эффективность переработки промышленных отходов и уменьшить их вредное воздействие на атмосферу.

Апробация результатов исследования. Результаты работы обобщены и доложены с публикацией в сборниках трудов на различных конференциях, таких, как «Студенческие дни науки в ТГУ», «Молодёжь. Наука. Общество», «Фундаментальные и прикладные научные исследования», «Развитие технических наук в современном мире». За участие в городской научной

студенческой конференции «Молодёжь. Наука. Общество» автор награждён дипломом II степени, участие в научно-практической конференции «Студенческие дни науки в ТГУ» - диплом победителя I этапа в конкурсе докладов по направлению секции «Техническое».

По теме диссертационного исследования опубликовано 5 статей.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Степень разработанности темы. Стеклобой используется в качестве добавки к цементу как вяжущее, в дисперсном состоянии стекло обладает вяжущими свойствами. Недостаточно изучена контактная зона зерна стекла с цементным камнем. В полной мере не изучено влияние количества и крупности зёрен стеклобоя на прочностные характеристики бетона.

1 Современное состояние вопроса использования стекольного боя в производстве строительных материалов

Самым распространённым способом для утилизации минеральных отходов на территории Российской Федерации является их захоронение. С экономической и экологической точек зрения, подобная практика не только наносит ущерб почвам, подземным водам, засоряет территории при захоронении твёрдых бытовых отходов, утрачиваются без возможности восстановления природные ресурсы, которые однажды уже были добыты и переработаны в материалы и изделия.

Для сокращения отходов и потерь сырья и материалов на всех стадиях их обработки, хранения и транспортировки и более полного их использования в производстве вторичных ресурсов и попутных продуктов необходимо создавать и внедрять малоотходные и безотходные технологии, совершенствовать управление качеством сырья и готовой продукции.

1.1 Экологические и экономические аспекты ресурсопользования

Треть потребляемых сырьевых ресурсов расходуется на производство промышленной продукции, остальная часть в виде продуктов побочного производства и отходов утрачивается.

По сравнению с рядом европейских стран, находящихся на одном уровне развития в сфере промышленности, Россия выделяется достаточно неблагоприятной ситуацией в области экологии. Около 16% территории Российской Федерации признано зоной с бедственной экологической ситуацией. Практически все крупные города имеют высокий уровень загрязнения.

Проблема экологически безопасного управления отходами потребления и производства является острой и требует незамедлительного решения. В последние годы объёмы промышленного производства сократились, снизились и объём образовавшихся промышленных отходов, но отрицательное воздействие данных отходов на качество жизни и

окружающую среду продолжает расти и увеличиваются объёмы их захоронения.

В последние десятилетия во всех развитых странах занимаются вопросами ресурсосбережения, в результате чего достигнуты высокие успехи в уменьшении отрицательного влияния отходов на окружающую среду. К сожалению, в России вопросами ресурсосбережения до сих пор занимались недостаточно, что постоянно приводит к ухудшению экологической ситуации.

Для достижения успехов в вопросе ресурсосбережения необходимо навести порядок в хранении, перемещении и использовании энергетических и сырьевых ресурсов, а также стимулировать создание новых технологий в вопросе ресурсосбережения. В этом вопросе ключевую роль играют структурные сдвиги в экономике и вторичная переработка (рециклинг) большинства отходов промышленности.

Скопление городских бытовых отходов и отходов промышленности является одной из основных проблем городов России. Данная проблема обусловлена низким развитием индустрии переработки этих отходов.

Главная задача государства в области ресурсопользования – это создать механизм, который будет направлен на экономное использование сырья, материалов, энергии и других ресурсов.

В 1996г. постановлением Правительства Российской Федерации от 13.09.96 № 1098 была утверждена Федеральная целевая программа «Отходы», в которой была прописаны мероприятия по комплексной переработке, утилизации, безопасного хранения и обезвреживания производственных и бытовых отходов. Этой программой было определено выполнить 156 пилотных проектов малоотходных технологий, производств по обезвреживанию, вторичному использованию и захоронению отходов. Предполагалось ежегодно перерабатывать до 55 млн т отходов, экономить материальные и энергетические ресурсы на 2–25%; сократить площади

земель, занятых под полигоны и свалки отходов, разработать новые процессы и оборудования, связанные с переработкой отходов.

Однако, Федеральная программа «Отходы» финансировалась недостаточно, выполнена лишь в небольшом объеме и была пролонгирована.

Ежегодно суммарные объемы образования отходов в России составляют около 2,5 млрд т. Более 90% из общего объема отходов составляют отходы добычи и обогащения полезных ископаемых.

Среди других видов выделяются такие отходы, как золошлаковые отходы ТЭС (объем их образования составляет около 40 млн т в год); металлургические шлаки (19 млн т); фосфогипс (5 млн т); макулатура (0,9 млн т); отработанные нефтепродукты (1,2 млн т); пиритные огарки (1,0 млн т); стеклобой - отходы производства (0,2 млн т); текстильные отходы (0,2 млн т); древесные отходы (16 млн м³). Эти отходы как вторичное сырье используются только на 35%.

Пути утилизации отходов, используемых как вторичное сырье в промышленности, следующие: сдача заготовительным организациям, переработка на предприятии-производителе, переработка на предприятиях своей отрасли, переработка на предприятиях других отраслей.

Для переработки вторичного сырья требуется капитальных вложений примерно в четыре раза меньше, чем при получении продукции из первичного сырья. Вкладывать средства в безотходные технологические процессы, которые берегут сырьевые и энергетические ресурсы и вместе с тем обеспечивают высокое качество продукции, выгодно. Научные исследования промышленных отходов и отходов городского хозяйства показывают возможность создания из них новых долговечных строительных материалов с высокими физико-механическими и экономическими показателями.

1.2 Проблема выделения и утилизации отходов стекла из городских свалок

Стеклобой (бой стекла, который образуется при производстве и использовании стеклянных изделий и листового стекла), извлеченный из твердых бытовых отходов, содержит неорганические огнеупорные примеси (корунд, муллит, кварц, фарфор и пр.), примеси магнитных и немагнитных металлов (консервные банки, металлические пробки, кольца и др.), а также органические примеси (бумага, картон, пластик). Поэтому стеклобой, выделяемый из городских отходов и предназначенный для вторичного использования, должен подвергаться такой обработке, чтобы при его использовании качество стекла не изменялось.

С точки зрения эффективности и качества отбора вторичных ресурсов, в частности стеклобоя, предпочтительна сортировка твердых бытовых отходов (ТБО) у источников их образования.

Постановлением мэрии городского округа Тольятти «Об утверждении Порядка сбора отходов на территории городского округа Тольятти (с изменениями на 27 ноября 2015 года)» [16] п. 2.9:

Физические лица обязаны:

- складировать отходы, в том числе мелкий сор и предметы, подлежащие удалению, в урны, контейнеры, бункеры-накопители в специально оборудованных местах в соответствии с их назначением и маркировкой (принадлежность контейнера, вид отхода);
- на специально оборудованных площадках для сбора крупногабаритных отходов складировать отходы аккуратно, мелкий сор должен быть предварительно помещен в прочные мешки, коробки, предотвращающие загрязнение территории при погрузке в специализированный автотранспорт.

В результате реализации указанной проблемы решаются следующие задачи:

- экологическая – уменьшение расходования природных ресурсов за счет возврата в производство вторичных материалов, а также продление срока действия существующих полигонов ТБО за счет уменьшения объемов отходов, поступающих на захоронение;

- эстетическая – внедрение отдельного сбора предполагает использование евроконтейнеров и мусоровозов с задней загрузкой, которые более гармонично вписываются в инфраструктуру города, удобны при сборе и транспортировке отходов;

- экономическая – получение дохода от реализации вторичного сырья и его расходование на дальнейшее развитие системы обращения с отходами, а также уменьшение затрат на вывоз ТБО для захоронения.

В составе стеклобоя допускается присутствие корковой пробки, бумаги и других органических примесей не более 2%.

Следует отметить, что с экологической точки зрения стекло является трудно утилизируемым отходом. Это коррозионностойкий материал, который не разрушается под действием воды, мороза, сильных и слабых органических и минеральных кислот, солей, бактерий. Стекло сохраняется без разрушений сотни лет.

Схема подготовки стеклобоя включает: сбор стекла, дробление, очистку от посторонних примесей, измельчение. После сортировки, дробления и отсева на фракции стекло можно использовать в бетонах в качестве крупного и мелкого заполнителя, а тонкомолотый порошок – в качестве связующего.

1.3 Использование стекольного боя в производстве строительных материалов

Добавка к цементу.

Стеклобой в тонкодисперсном состоянии является гидравлическим вяжущим автоклавного твердения, а в естественных условиях и при пропаривании он вяжущих свойств не проявляет. Поэтому различные виды стекольных отходов используют в качестве вяжущего в бесцементных

бетонах. Молотое стекло реагирует с цементными гидратами, в результате чего химический состав цемента улучшается. Цемент становится прочнее и долговечнее и не впитывает воду так быстро, как обычный цемент.

На активность вяжущего из стеклобоя влияют его химический состав, тонкость помола, водовязущее отношение и параметры автоклавной обработки. С увеличением тонкости помола вяжущего увеличивается его удельная поверхность, в результате чего возрастает его растворимость и количество точек соприкосновения между частицами стеклобоя и заполнителя. С этим связан рост прочности стеклобетона.

Добавка при изготовлении кирпича.

Стеклобой успешно применяется как добавка при изготовлении керамических кирпичей. Замена 50% глины стеклобоя температура обжига кирпича понижается с 1170°С до 900° С. Производительность печи при этом возрастает ~ на 30%. Качественные кирпичи получаются из смеси: стеклобой -30%, отходы кирпича 60% и глина-10%. Такие кирпичи атмосферостойкие, используются в качестве облицовочных материалов. Этот композитный кирпич легче обычного кирпича более чем в два раза, стоит дешевле, обладает требуемой огнеупорностью и водостойкостью.

Теплоизоляционные и звукоизоляционные.

Наиболее целесообразным способом утилизации стекольного боя является производство долговечных и экологически чистых тепло- и звукоизоляционных и композиционных строительных материалов, в частности различных видов пеностекла.

Из стеклобоя получают гранулированное пеностекло с оплавленной поверхностью по простой технологии: стеклобой измельчают, увлажняют, гранулируют, опудривают золой и спекают. Различные пористые изоляционные материалы экономически выгодно можно изготавливать из стекольного боя в смеси со шлаком.

В МГСУ, на кафедре «Технология отдельных и изоляционных материалов» разработан эффективный теплоизоляционный водостойкий и

экологически чистый материал ячеистой структуры с пониженной средней плотностью на основе жидкого стекла и несортированного боя технических стекол. Прогрессивная технология «сухой минерализации пены» и отказ от энергоемкой автоклавной обработки позволяют получать изделия из ячеистого бетона на основе стеклобоя, предназначенные для устройства тепловой изоляции промышленных и гражданских зданий, а также промышленного оборудования и трубопроводов с температурой изолируемой поверхности до 6000 °С и более.

Также специалистами МГСУ разработана методика подбора состава пенобетона на основе стеклобоя, технологическая схема, включающая дробильно-помольное отделение, отделение приготовления формовочной массы, посты формования, тепловой обработки, выдержки и доводки изделий, распалубки и упаковки. Проведенные испытания полученного материала в соответствии с действующими ГОСТ показали, что ограждающие конструкции из ячеистого бетона на основе стеклобоя средней плотностью 400-900 кг/м³ не только не уступают по свойствам конструкциям на основе автоклавных цементных ячеистых бетонов, но и значительно превосходят их.

Стеклобетон в современном строительстве и его уникальность.

Бетон, армированный специальным стекловолокном, называется стеклобетоном или стеклофибробетоном, этот строительный универсальный материал действительно замечателен и уникален. Технология получения такого бетона была разработана еще больше 40 лет назад в 1969 году, стеклобетон - это общее название для целого семейства похожих аналогичных материалов, которые все чаще и чаще сегодня используются в самых различных областях строительства. Стеклобетон внес огромный вклад в мировое строительство и сделал мировую строительную индустрию более универсальной, эстетичной и уникальной.

Стеклобетон - это композиционный эффективный материал, отличающийся отличными строительными характеристиками и при этом он

не требует серьезных энергетических затрат на его производство. Состоит этот вид бетона из природных экологически чистых компонентов и выпускается сегодня в большом разнообразии строительных изделий. Архитекторы и проектировщики сегодня все чаще используют стеклобетон в строительстве, так как этот материал обладает отличной стойкостью и прочностью, эксплуатационной общей гибкостью, внешней уникальной выразительностью и приемлемой стоимостью.

Строительные возможности стеклобетона.

Свойства и качества изделий из стеклобетона могут изменяться при добавлении и изменении количества используемых акриловых полимеров, быстросхватывающегося специального цемента и ряда других добавок. Широко используется сегодня бетон на основе щелочестойких стеклянных волокон, такой бетон отвечает самым повышенным технологическим современным требованиям. Этот материал используется при изготовлении сложных строительных различных конструкций и отличается универсальностью и способностью воплощения в жизнь самых сложных художественных идей.

Стеклобетон сегодня имеет просто огромный спектр общего применения, он используется при изготовлении отделочных панелей, решеток для ограждения, стен и перегородок, сложных архитектурных прозрачных крыш. Из стеклобетона делают также инженерные трубы, шумозащитные специальные барьеры, карнизные блоки, черепицу, купола, облицовку, цветочницы и многие другие изделия. То есть современный стеклобетон и его многочисленные виды широко используются и для создания архитектурных уникальных строений, и для изготовления инженерных конструкций и сооружений, а также для производства различных художественных деталей и элементов.

1.4 Роль дисперсности компонентов бетонных композиций в получении высококачественных бетонов

Для значительного улучшения качества бетона и повышения его характеристик, к формированию изделий требуется использовать новые технологические подходы. Для снижения значения водоцементного соотношения были освоены такие технологические инструменты, как высокоэффективные способы уплотнения: виброуплотнение, виброуплотнение с пригрузом, виброштампование, вибровакуумирование и т.п. Благодаря данным технологиям повышается прочность бетона в 1,5-2 раза, также значительно увеличиваются водонепроницаемость, морозостойкость, сопротивление истиранию бетона и сцепление с арматурой.

С целью выпуска высококачественных бетонов были разработаны, во-первых, новейшие методы пластифицирования бетонных смесей, во-вторых, были получены наиболее активные пуццолановые добавки с высоким количеством наночастиц верхнего нанометрического уровня (100-300 нм) – микрокремнеземов, высокодисперсных золь и дегидратированных каолинов. Сочетание суперпластификаторов с гиперпластификаторами на поликарбоксилатной, полиакрилатной и полигликолиевой основах позволяет сегодня получать сверхтекучие цементно-минеральные дисперсные системы и бетонные смеси.

Увеличение удельной поверхности цемента, его реакционной способности (активности) оказывает значительное влияние на формирование структуры бетона, скорость твердения и окончательные прочностные характеристики. Использование активированного цемента позволяет сформировать более плотную и однородную структуру бетона, что дает резкий прирост суточной прочности и последующее ее увеличение по истечению 28 суток твердения. Повышение прочности цементного камня в начальные сроки твердения в значительной степени обуславливается именно тонкостью помола.

Таким образом, с увеличением дисперсности помола портландцемента повышается его активность и прочность затвердевшего цементного камня. Увеличение прочности цементного камня открывает широкие возможности снижения расхода портландцемента при производстве бетонных изделий с нормируемыми показателями прочности.

В трудах исследователей отмечено одно явление - повышение редуцирующего действия суперпластификаторов с возрастанием дисперсности порошков. Они предлагают увеличить долю ультрадисперсных составляющих добавлением к цементу активного высокодиспергированного микрокремнезема.

Использование в последние годы более мелких фракций песка (0,1-0,5мм) послужило для перехода в промышленности от обычного бетона к мелкозернистому. В настоящее время активно ведутся разработки в производстве реакционно-активных порошковых бетонов.

Минеральные добавки уже давно стали обязательным компонентом в любом высокопрочном бетоне. Они вводятся в достаточно больших количествах (50-150 кг/м³ и более) и в сравнении с другими видами добавок оказывают наиболее многоаспектное воздействие на структуру и свойства бетона.

Различают несколько групп высокодисперсных материалов:

- микронаполнители или инертные добавки (пылевидные отходы при дроблении горных пород и т.д.);
- активные минеральные добавки с небольшой пуццоланической активностью (золы ГРЭС);
- высокоактивные добавки (микрокремнезем, природные пуццоланы, электрофильтровые сланцевые золы).

Такое разделение нельзя назвать точным, так как добавки, инертные при обычной дисперсности (200 - 500 м²/кг) становятся высокоактивными при сверхтонком измельчении (более 1500 м²/кг).

Микрокремнезем является высокодисперсным, низкоплотным, пылящим материалом, что создает проблемы при его транспортировании, хранении, дозировании и перемешивании с другими компонентами бетона [29]. Кроме того, микрокремнезем значительно повышает водопотребность бетонных смесей. Введение его в состав от 10 до 30% от массы цемента увеличивает водопотребность вяжущего по нормальной густоте с 25 до 29%. При этом для равнопластичных бетонных смесей ($OK = Const$) сокращается расход цемента до 30%, тогда как такое же количество микрокремнезема в бетонной смеси того же состава, но при постоянном расходе цемента увеличивает пластичность по осадке конуса в 4 раза. Все это указывает на то, что его применение без водоредуцирующих добавок не эффективно. В связи с этим, в последние годы были разработаны добавки, включающие в свой состав микрокремнезем и суперпластификаторы, иногда и другие материалы различного назначения, например, регуляторы твердения [30]. Применение комплексной добавки упрощает технологию бетона с микрокремнеземом.

Допустимая область применения бетонов с микрокремнеземом при его дозировках до 30% от массы цемента в составе бетона – все бетонные и железобетонные конструкции сооружений жилищно-гражданского и промышленного строительства, включая системы питьевого водоснабжения. Применение микрокремнезема в массовом строительстве также позволяет экономить до 40% цемента без ухудшения характеристик бетона.

Как и все пуццолановые материалы, микрокремнезем вступает в реакцию с гидроокисью кальция $Ca(OH)_2$, образующейся при гидратации портландцемента в процессе гидратации вяжущих соединений. Высокая чистота и повышенная дисперсность микрокремнезема способствует более эффективной и быстрой реакции. При надлежащем рассеивании тысячи реактивных сферических микрочастиц окружают каждое зерно цемента, уплотняя цементный раствор, заполняя пустоты прочными продуктами гидратации и улучшая сцепление с заполнителями [30]. Степень пуццолановой активности зависит от содержания реактивного кремнезема,

но на практике между двумя различными видами сырья с высоким содержанием кремнезема существует довольно незначительное различие.

Микрокремнезем может обеспечить прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов. При использовании природных заполнителей достигается прочность свыше 150 МПа, а при использовании специальных высокопрочных заполнителей можно достичь прочности 300 МПа.

В работе [31], написанной Федоркиным С.И., Макаровой Е.С. и Елькиной И.И., описывается влияние микрокремнезема на физико-механические свойства шлакопортландцемента, добавляя микрокремнезем к цементу в количестве 0, 5, 10, 15, 20%.

Частицы микрокремнезема заполняют зазоры между зернами цемента и по мере гидратации вовлекаются в этот процесс. Участие микрокремнезема в образовании продуктов гидратации приводит к увеличению качества мелких гелевых пор, входящих в состав кальцесиликатного гидрогеля, а также снижает капиллярную пористость. Это приводит к увеличению плотности и прочности цементного камня. Авторы наглядно показали эффект влияния микрокремнезема. В бетоне без микрокремнезема зона между цементным гелем и частицей заполнителя (переходная зона) из-за неплотной укладки частиц цемента у поверхности заполнителя представляет собой пространство, заполненное перенасыщенным раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В процессе твердения данное пространство заполняют кристаллы извести, кристаллизующиеся из раствора.

Зона между цементным гелем и частицей заполнителя отличается от основного объема цементного геля пониженной плотностью, когезионной и адгезионной прочностью.

Д. Дж. Паркер в своей работе [38] доказал, что 1 кг микрокремнезема может обеспечивать такую же прочность, как 3-5 кг обычного портландцемента в смесях одинаковой удобоукладываемости при умеренном содержании микрокремнезема и цемента в обеих смесях. На эту

эффективность оказывает влияние содержание обоих материалов, но при содержании обычного портландцемента 200-300 кг/м³ и микрокремнезема – менее 10%. При добавлении микрокремнезема в количестве до 30% в сочетании с суперпластификатором можно получить смеси с отношением вода/вяжущее ниже 0,3. Такие бетоны могут достигать очень высокой ранней прочности, и они нашли широкое применение там, где осуществляется выдерживание во влажном режиме.

Также в его работе отмечено, что по количеству теплоты, выделяемой при гидратации, микрокремнезем находится между обычным портландцементом и портландцементом RHPC, хотя нарастание теплоты происходит медленнее. Для смесей эквивалентной прочности тепловыделение в целом будет меньше, поскольку общее содержание вяжущих материалов значительно снижено.

Эффект заполнения пор, создаваемый пуццолановыми сферическими микрочастицами, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании микрокремнезема и сравнительно низком содержании обычного портландцемента. Поскольку микрокремнезем оказывает большее влияние на проницаемость, чем на прочность, бетон с добавлением микрокремнезема всегда будет гораздо менее проницаемым, чем бетон эквивалентной прочности на обычном портландцементе без добавок.

Марка по водонепроницаемости модифицированного цементного бетона с добавкой микрокремнезема до 20% от массы цемента достигает значения W16.

Низкая проницаемость и повышенная плотность цементного камня обеспечивает прекрасную морозостойкость бетона с микрокремнеземом. Не существует несовместимости микрокремнезема с воздухововлекающими добавками, в действительности же стабильная реологическая структура

пластичного бетона с микрокремнеземом должна уменьшать потерю вовлеченного воздуха при транспортировке и вибрировании.

1.5 Высокопрочный бетон

В последние годы разработаны новые технологии производства бетона, который был и остается самым важным материалом в строительстве. Передовые технологии производства бетонов основаны на изучении химических процессов, происходящих в цементном камне. Для этого используются комплексные модифицированные добавки нового поколения, передовые методики подбора и оптимизации состава бетона. Среди минеральных добавок, которые используются для повышения прочности бетонов, выделяется микрокремнезем, состоящий из микроскопических частиц SiO_2 аморфной структуры. Микрокремнезем воздействует на цементный камень следующим образом:

- он заполняет пространство между частицами цемента и уплотняют структуру бетона, что приводит к снижению проницаемости бетона и увеличению его долговечности,

- происходит химическое взаимодействие микрокремнезема с цементным камнем, что ускоряет процесс набора прочности и упрочнение цементного камня.

Микрокремнезем как высокореакционная добавка используется в производстве изделий железобетонных изделий, высокопрочных бетонов с высокоэксплуатационными свойствами, тротуарной плитки, сухих строительных смесей, наливных полов и других изделий.

Открывшиеся возможности для использования микрокремнезёма связаны с развитием в области производства эффективных суперпластификаторов. Сочетание микрокремнезёма и суперпластификаторов стало толчком для создания бетонов нового поколения, которые обладают высокой прочностью (60-150 Мпа), высокой удобоукладываемостью и долгим сроком службы. Основная задача суперпластификаторов – снизить количество воды затворения в процессе

приготовления бетонной смеси, в результате чего происходит улучшение характеристик бетона.

Высокопрочный бетон получают на основе цемента высоких марок, качественных песка и щебня.

Для изготовления бетона с высокой прочностью используют цемент с высокой активностью, для чего осуществляют домол и активацию цемента, используют при изготовлении бетона высокий расход цемента. При этом вяжущее должно быть низкой водопотребности, которое получают совместным помолом высокомарочного цемента и суперпластификатора.

В качестве крупного заполнителя для изготовления высокопрочных бетонов должен использоваться фракционированный щебень из плотных и прочных горных пород, таких как изверженные породы. Например, гранитный щебень, имеющий марку по дробимости в цилиндре М1200 – М1400.

2 Характеристики исходных материалов. Методы исследования и испытаний

2.1 Систематические погрешности и оценка доверительных интервалов

Экспериментально определить истинное значение любой случайной величины невозможно, поэтому на практике при многократных наблюдениях определяется ее среднее арифметическое значение. Эта величина максимально приближена к истинному значению и может использоваться вместо него.

По способу получения числового значения искомой величины измерения делят на прямые, косвенные, совокупные и совместные. Это стоит учитывать при обработке экспериментальных данных и расчета погрешностей.

При измерении значения возникают погрешности. Погрешности могут быть систематическими и случайными. Случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений. Невозможно вывести случайную погрешность, если произведено одно измерение. В данной работе можно выделить ряд систематических ошибок:

- влияние меняющейся влажности и температуры в лаборатории;
- систематические (инструментальные) погрешности используемых приборов (весы, гидравлический пресс, измерительные приборы и т.д.);
- влияние остающейся влаги в объеме предмета исследования при серии образцов для многократных испытаний;

Для получения максимально близкого истинного значения необходимо использовать ряд практических рекомендаций, вытекающих из положений теории вероятности.

Достоверность полученных экспериментальных значений подтверждается данными обработками многократных наблюдений с построением соответствующих доверительных интервалов для каждой серии многократных наблюдений. Общая относительная погрешность рассчитывалась методами учета доверительных интервалов и

неисключенных остатков систематических погрешностей, в том числе по рекомендациям ГОСТ 8.207-76 [1].

2.2 Методы исследований

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

2.2.1 Изучение свойств мелкого заполнителя

В качестве мелкого заполнителя для изготовления бетонов использовались песок Волжского месторождения и дробленый песок из гранита Челябинской области.

Качество мелкого заполнителя оценивалось по методикам, изложенным в ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», в соответствии с требованиями, предъявляемым к песку ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 31424-2010 «Материалы строительные нерудные из отсеков дробления плотных горных пород при производстве щебня. Технические условия» как мелкому заполнителю.

Зерновой состав песка определяют при помощи стандартного набора сит с ячейками размера: 5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315 и 0,16. «Навеску сухого песка просеивают через набор сит и определяют сначала частные (%), а затем полные остатки на каждом сите. Полный остаток на любом сите равен сумме частных остатков на этом сите и всех ситах большего размера. Размеры полных остатков характеризуют зерновой состав песка» [9].

На основании результатов ситового анализа рассчитывают безразмерный показатель - модуль крупности песка ($M_{кр}$):

$$M_{кр} = (A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}) / 100, \quad (2.1)$$

где: $A_{2,5}$, $A_{1,25}$, $A_{0,63}$, $A_{0,315}$, $A_{0,16}$ - полные остатки на ситах с размерами ячеек соответственно 2,5, 1,25, 0,63, 0,315 и 0,16 мм.

Насыпную плотность песка определяют с помощью цилиндрического сосуда вместимостью 1 дм³ (заранее надо определить массу пустого сосуда m_c , г). Совком с высоты 10 см песок засыпают в мерный сосуд до тех пор, пока песок не образует конус над краями сосуда. Избыток песка срезают вровень с краями сосуда, и сосуд с песком взвешивают, определяя массу песка в сосуде по формуле:

$$\rho_{\text{нас}} = m_{\text{с+п}} - m_c / V, \quad (2.2)$$

где $m_{\text{с+п}}$ – масса сосуда с песком, г, V – объем сосуда, см³.

Содержание пылевидных и глинистых частиц в песке определяются по методике методом отмучивания в процентах по массе по формуле:

$$П_{\text{отм}} = (m - m_1 / m) \cdot 100, \quad (2.3)$$

где: m – масса сухой навески до отмучивания, г,

m_1 – масса сухой навески после отмучивания, г.

2.2.2 Изучение свойств крупного заполнителя

В качестве крупного заполнителя для бетона использовали гранитный щебень крупностью 5 – 10 и 10 – 20 мм Челябинской области. Качество щебня определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний».

«Насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$ определяется путем взвешивания пробы заполнителя в сосуде с известной вместимостью по формуле:

$$\rho_{\text{нас}} = (m - m_c) / V_c, \quad (2.4)$$

где m - масса пробы заполнителя с сосудом, кг,

m_c - масса сосуда, кг. V_c - вместимость сосуда, м³» [10].

«Прочность крупного заполнителя определяется методом раздавливания его пробы в сухом или насыщенном водой состоянии в металлическом цилиндре с вычисление показателя дробимости D_p (%). Дробимость заполнителя оценивается по количеству мелочи, образующейся при сдавливании пробы щебня в стальной форме под определенным

усилием» [3]. Показатель дробимости D_p (%) вычисляют с погрешностью до 1% по формуле:

$$D_p = (m_1 - m_2 / m_1) 100, \quad (2.5)$$

где m_1 – испытываемая проба щебня, кг,

m_2 - остаток на контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня, кг.

«Марку щебня определяют по показателю дробимости в зависимости от вида горной породы и способа испытания» [10].

«Содержание в щебне пластинчатых (лещадных) и игловатых зёрен определяется визуально отбором в навеске зёрен, толщина или ширина которых меньше длины в три и более раза. Взвешивают количество пластинчатых (лещадных) и игловатых зёрен и вычисляют их содержание в % по массе. Исходя из результатов, определяют группу щебня по содержанию зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы» [10].

2.2.3 Подбор оптимального состава бетонной смеси с применением стеклобоя

С целью изучения возможности использования стеклобоя в качестве заполнителя для изготовления бетона были использованы гранитный щебень фракции 5-10 и 10-20 мм, в качестве мелкого заполнителя – природный песок Волжского месторождения и дробленый песок из гранитной породы. Стеклобой крупностью 0 – 20 мм вводился в состав пластичной бетонной смеси в количестве 0, 30, 50, 70 и 100 % от массы мелкого заполнителя, заменяя песок данным количеством стеклобоя.

Для исследований были подобраны для конкретных задач оптимальные составы бетонов. Подвижность бетонных смесей была принята в пределах от 4 до 8 см.

Оптимальный состав бетона определяют расчетно-экспериментальным методом в три этапа:

1. Проектирование состава бетона на основе исходных данных с помощью формул, графиков и таблиц.

2. Уточнение состава бетона на пробных замесах.

3. Определение фактического расхода составляющих материалов на 1 м³ бетона, исходя из расхода материалов на оптимальный пробный замес и объема этого замеса, вычисленного по экспериментально определенной средней плотности бетонной смеси.

Окончательно состав бетона выражается в виде расхода материалов на 1 м³ бетона или в частях по массе или по объему по отношению к цементу (В/Ц при этом всегда выражается по массе).

2.2.4 Изучение свойств бетонной смеси

Влияние суперпластификаторов на свойства бетонных смесей и бетонов с помощью комплексных методов исследования, изложенных в государственных нормативно-технических документах.

Оценку подвижности бетонной смеси определяют в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

«Готовую бетонную смесь для определения ее подвижности загружают в стандартный конус, установленный на металлический поддон. Перед испытанием конус и все приспособления очищают и протирают влажной тканью. Загрузку бетонной смесью производят в три слоя, штыкуя каждый слой 25 раз. Конус во время наполнения должен быть плотно прижат к поддону. После уплотнения бетонной смеси ее избыток срезают вровень с верхним краем конуса» [7].

«Далее конус плавно снимают с бетонной смеси и ставят рядом с ней. Осадку конуса бетонной смеси (ОК) определяют, укладывая металлическую линейку ребром наверх конуса и измеряя расстояние от нижней грани линейки до верха бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см. Осадка конуса из бетонной смеси в сантиметрах служит показателем подвижности» [7].

Приготовленную смесь укладывают в металлические разъемные формы, затем уложенную бетонную смесь в формах уплотняют на виброплощадке, после чего приготовленные образцы бетона хранят в формах

в течение суток во влажных условиях. Размеры и форму образцов строго выдерживают, т.к. они влияют на результат испытания. Через сутки образцы бетона распалубливают, после чего они хранятся в течение 7, 14 и 28 суток в нормальных условиях твердения.

2.2.5 Определение физико-механических свойств бетонов

Предел прочности при сжатии бетонов определяли на образцах-кубах размерами 70,7x70,7x70,7 мм и 100x100x100 мм на гидравлическом прессе с нагрузкой 125 и 250 т. Перед испытанием на прочность образцы бетона измеряли и взвешивали с погрешностью не более 1%. Прочностные характеристики бетонных образцов определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

При тепловлажностной обработке образцов бетона соблюдали мягкий режим твердения (температура не выше 70 град. С) с предельной скоростью подъема и снижения температуры обработки не более 25 °С/ч.

Нагружение образца при испытании на сжатие производили плавно до его полного разрушения, максимальное усилие определяло разрушающую нагрузку.

Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ (МПа) испытуемого образца рассчитывают по формуле:

$$R_{сж} = 10 F_{разр} / A, \quad (2.6)$$

где A — площадь поперечного сечения образца, $см^2$,

$F_{разр}$ - разрушающая сила, кг.

При испытании образцов-кубов бетона размером 70,7 x 70,7 x 70,7 мм в соответствии с требованиями ГОСТ имеется коэффициент пересчета прочности образцов данного размера на прочность образцов стандартного размера (150 x 150 x 150 мм) $K = 0,85$, для образцов-кубов размером 100 x 100 x 100 мм - $K = 0,95$.

2.2.6 Методика исследования цементного камня

Контактную зону зерна заполнителя с цементным камнем бетонных образцов исследовали при помощи электронного растрового настольного микроскопа JEOL 6000 при увеличении от 24 до 4000 раз.

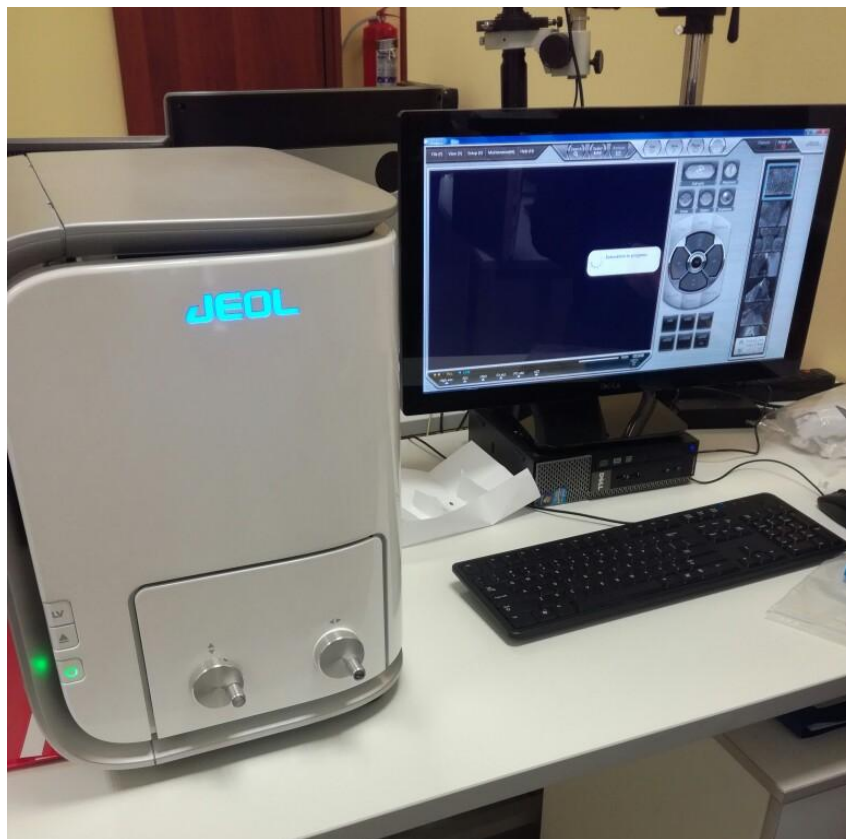


Рисунок 2.1 – Электронный растровый микроскоп JEOL 6000

Отношение размера изображения на мониторе к размеру растра на образце определяет увеличение микроскопа. Создание устойчивого изображения диэлектрических объектов в режиме «low vacuum» обеспечивается благодаря напуску воздуха в камеру образца, в результате чего сохраняется возможность наблюдения непроводящих объектов без предварительного напыления токопроводящего покрытия.

При работе микроскопа обеспечиваются безопасные условия труда оператора. При максимальных значениях ускоряющего напряжения и тока зонда мощность эквивалентной дозы рентгеновского излучения в любой доступной точке на расстоянии 10 см от поверхности колонны и камеры объектов микроскопа не превышает 1 мкЗв/ч.

2.3 Характеристика применяемых материалов

2.3.1 Портландцемент

При выполнении экспериментальных исследований в качестве вяжущего использовался быстротвердеющий цемент ЦЕМ II / А-К (Ш-П) 32,5Б, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515-97 «Цементы. Общие технические условия» (ЗАО «ЖСМ», г. Жигулевск).

Таблица 2.1 – Показатели качества цемента ЦЕМ II / А-К (Ш-П) 32,5Б.

Показатели	Значение
1. Строительно-технические свойства цемента	
Предел прочности при сжатии в возрасте: 2 суток	15,2 МПа
28 суток	40,7 МПа
Начало схватывания	164 мин
Конец схватывания	257 мин
Нормальная густота цементного теста	26,7 %
Наличие ложного схватывания	Отсутствует
Тонкость помола, проход через сито №008	93,5 %
Равномерность изменения объема	0,4 мм
Содержание минеральной добавки (гранулированный шлак + опока)	18,3 %
2. Минералогический состав клинкера (расчетный), %	
Трехкальциевый силикат (C_3S)	60,0
Двухкальциевый силикат (C_2S)	15,0
Трехкальциевый алюминат (C_3A)	7,6
Четырехкальциевый алюмоферрит (C_4AF)	12,6
3. Санитарно-эпидемиологические свойства цемента	
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов $A_{эфф}$	93,2 Бх/кг

Для изготовления данного цемента используется клинкер, природный гипсовый камень и комплексная минеральная добавка – опока и доменный гранулированный шлак. Опока способствует снижению водоотделения и высолообразования на поверхности изделий, повышению плотности и водоудерживающей способности бетона. Доменный гранулированный шлак повышает пластичность бетонных растворов и придает изделиям стойкость к воздействию минерализованных вод. Вещественный состав цемента и его дисперсность обеспечивают оптимальную нормальную густоту, высокие прочностные показатели в ранние сроки (2 и 7 суток) твердения, что позволяет снижать удельный расход цемента в бетоне и повысить его прочность. Наличие трехкальциевого алюмината в клинкере в пределах до 8% способствует незначительному тепловыделению в процессе гидратации (твердения) цемента. Низкое содержание щелочей в пересчете на $\text{Na}_2\text{O} = 0,6-0,8 \%$ позволяет применять различные заполнители при производстве бетона и изделий из него.

Вторым вяжущим, который был использован при выполнении экспериментальных исследований, является портландцемент завода-производителя ООО «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия». Данный портландцемент является нормальнотвердеющим и выпускается с классом прочности 42,5 и содержит до 5 % известняка в качестве вспомогательного компонента. Известняк натурального происхождения, т.е. инертная минеральная добавка – наполнитель к цементу, улучшает структуру цементного камня и реологические свойства цемента.

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

- низкое содержание Cl^- примерно 0,01%, по отношению к норме 0,1%.

Это способствует увеличению срока эксплуатации за счет уменьшения коррозии арматуры в бетоне;

- низкое содержание щелочей R_2O примерно 0,4 – 0,5%, увеличивается стойкость трещинообразованию;

- оптимальное содержание C_3A от 7% - 7,5%;

- средняя тонкость помола по Блейну 3440 $см^2/г$.

Характеристика портландцемента «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н приведена в таблице 2.2.

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

Наименование характеристики	Значение
Строительно-технические свойства цемента	
Класс по прочности при сжатии, 28 суток	42,5
Подкласс по прочности на сжатие, 2 - 7 сутки	Нормальнотвердеющий
Нормативный документ	ГОСТ 31108-2016
Прочность при сжатии в возрасте 2 суток (МПа)	19,39
Прочность при сжатии в возрасте 7 суток (МПа)	37,63
Прочность при сжатии в возрасте 28 суток (МПа)	49,92
Прочность при сжатии в возрасте 28 суток, не более (МПа)	62,5
Начало схватывания, (мин) не ранее	60
Содержание инертной минеральной добавки - известняка (%)	5
Начало схватывания	175 мин
Конец схватывания	235 мин
Нормальная густота цементного теста	27,92 %
Тонкость помола, проход через сито №008	98,2 %
Минералогический состав клинкера, %	
Трехкальциевый силикат (C_3S)	63,82
Двухкальциевый силикат (C_2S)	13,69

Продолжение таблицы 2.2

Трехкальциевый алюминат (C_3A)	6,77
Трехкальциевый алюминат (C_3A) + Четырехкальциевый алюмоферрит (C_4AF)	17,95
Содержание щелочей R_2O	0,4
Санитарно-эпидемиологические свойства цемента	
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов $A_{эфф}$	93,2 Бк/кг

Использованный портландцемент ООО «Азия цемент» ЦЕМ I 42,5Н удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия»

2.3.2 Мелкий заполнитель

Для приготовления бетонов в качестве мелкого заполнителя использовались природный песок Волжского месторождения и дробленый песок из гранитного щебня Челябинской области.

Таблица 2.3 – Характеристика природного и дробленого песка и стеклобоя.

Характеристика	Наименование материала		
	Природный Волжский песок	Дробленый песок из гранита	Стеклобой 0 – 10 мм
Насыпная плотность, кг/м ³	1470	1487	1402
Гранулометрический состав			
Остатки на ситах, мм (частные/полные)			
20	—	—	—
10	—	-	—
5	—	-	—
2,5	$\frac{0,4}{0,4}$	$\frac{17,98}{44,29}$	$\frac{24,4}{24,4}$
1,25	$\frac{0,4}{0,8}$	$\frac{11,35}{55,64}$	$\frac{15,4}{39,8}$
0,63	$\frac{1,2}{2,0}$	$\frac{3,83}{59,47}$	$\frac{5,2}{45,0}$

Продолжение таблицы 2.3

0,315	$\frac{30,0}{32,0}$	$\frac{8,4}{67,87}$	$\frac{11,4}{56,4}$
0,16	$\frac{66,0}{98,0}$	$\frac{8,84}{76,71}$	$\frac{0,16}{68,4}$
<0,16	$\frac{2,0}{100}$	$\frac{23,29}{100}$	$\frac{31,6}{100}$
М кр.	1,33	3,40	3,46

Согласно ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» природный Волжский песок по значению модуля крупности относится к группе песка «очень мелкий». Полный остаток песка на сите с сеткой № 63 не соответствует значениям, указанным в таблице 2 ГОСТ 8736-2014.

Дробленый песок из гранитных пород по значению модуля крупности относится к группе песка «повышенной крупности». По содержанию зерен на сите с размером ячеек 0,63 мм дробленый песок соответствует требованиям соответствующего ГОСТ 8736-2014.

Стеклобой содержит 3,05 % зерен крупностью 10 - 20 мм и 29,66 % зерен крупностью 5-10 мм. По модулю крупности стеклобой относится к группе песка «повышенной крупности».

Содержание пылевидных и глинистых частиц в природном песке – 0,7 % по массе (нормы ГОСТ 8736-2014 – до 6%), в дробленом песке из гранитных пород – 0,1 %. Глина в комках отсутствует.

Наличие органических примесей в песке определялось в соответствии с ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Песок при обработке щелочным раствором гидроксида натрия не придает раствору окраску, соответствующую или темнее эталона, что соответствует требованиям ГОСТ.

Сравнивая свойства природного песка и дробленого песка гранитных пород, необходимо отметить основные различия между этими материалами. Природный песок в основном является кварцевым, имеет гладкую

поверхность и округлую форму зерна. Состав дробленого песка аналогичный составу исходных гранитных пород, форма зерна угловатая и шероховатая. Сцепление с цементным камнем поверхности зерен дробленого песка более сложное, отличное от сцепления поверхности зерен природного песка с цементным камнем. Шероховатая поверхность зерен дробленого песка более активна, что способствует более крепкому слипанию частиц. Развитая поверхность зерна способствует увеличению его водопоглощения.

2.3.3 Крупный заполнитель

В качестве крупного заполнителя бетона со стеклобоем использовался щебень гранитных пород Челябинской области. Данный щебень фракции 5 – 20 мм соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ» (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Технические характеристики гранитного щебня.

№ п/п	Наименование технической характеристики	Значение технической характеристики
1	Марка по дробимости	M1400
2	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы	I группа (до 10%)
3	Марка по истираемости	И1
4	Насыпная плотность	1470 кг/м ³
5	Морозостойкость	F300
6	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	0,8
7	Содержание глины в комках, % по массе	Нет
8	Содержание зерен слабых пород, % по массе	Нет
9	Содержание вредных примесей	Нет
10	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов	Менее 370 Бк/кг, 1 класс для любых видов строительства

2.3.4 Стеклобой

Масштабы образования стеклобоя в качестве отхода достаточно внушительны. На отходы производства приходится 0,32 млн тонн в год. Помимо этого, стекло занимает 5-7% от всего объёма твёрдых бытовых отходов, что составляет около 1,3...1,9 млн тонн ежегодно.

В исследованиях использовался стеклобой из тарного стекла с крупностью фракции 0-20 мм и насыпной плотностью 1402 кг/м³. Характеристика стеклобоя приведена в таблице 2.3, химический состав – в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Химический состав тарного стекла.

Химический элемент	SiO ₂	Al ₂ O ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
Процентное содержание, %	71,5...73,7	0,2...3,3	1,7...3,2	5,2...9,1	0,1...0,6	15,2...16	до...0,2

Установлено, что стеклобой в тонкодисперсном состоянии представляет собой вяжущее вещество автоклавного твердения, а в естественных условиях и при пропаривании он вяжущих свойств не проявляет. В процессе автоклавной обработки образуется низкотемпературный кварц, кристобалит, а также в незначительных количествах низкоосновные гидросиликаты натрия. [3]

2.3.5. Наполнитель цемента

Гранулометрический состав составляет 0,1 микрона, что в 100 раз меньше среднего размера зерна цемента.

Частицы микрокремнезема имеют гладкую поверхность и сферическую форму. Основным компонентом отхода является диоксид кремния в аморфной форме. Химический состав микрокремнезема представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Химический состав микрокремнезема

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	S
%	90-92	0,68	0,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

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

Тонкость микрокремнезема можно сравнить с тонкостью других порошкообразных материалов:

- микрокремнезем – 140000 – 300000 см²/г,

- зола-уноса – 4000 – 7000 см²/г,
- портландцемент – 3000 – 4000 см²/г.

Микрокремнезем способствует уменьшению расхода цемента до 200 – 450 кг/м³, обладает высокой прочностью на сжатие 60 – 80 МПа и выше 80 МПа для мелкозернистых бетонов, повышает антикоррозионную стойкость, снижает водонепроницаемость на 50%, что повышает долговечность бетонов.

2.3.6 Поликарбоксилатные пластификаторы

Поликарбоксилатные гиперпластификаторы обладают высоким уровнем водопонижения до 30%, стабильностью и долговечностью, а так же предотвращают расслоение бетонной смеси. Механизм работы гиперпластификаторов следующий: вначале они адсорбируются на поверхности зерен цемента, затем после адсорбции на поверхности зерен гиперпластификаторы на разных зернах начинают отталкиваться друг от друга – диспергировать частицы цемента. Данные гиперпластификаторы используют свою объемную полимерную структуру для стерического или физического расталкивания.

В исследованиях использовался гиперпластификатор STACHEMENT 2280 — высокоэффективный жидкий, готовый к применению, изготовлен на основе поликарбоксилатов. Относится к разряду «быстрых» гиперпластификаторов, т.к. обладает ускоряющим эффектом и соответственно даёт высокие ранние прочности бетона.

STACHEMENT 2280 предназначен для производства качественных конструкционных бетонов. Внешний вид: красно-коричневая жидкость. Продукт не горюч и физиологически безвредный. Плотность при 20 °С — 1,065 ± 0,030 г/мл. PH – 7 – 10.

Положительные качества:

- Экономит цемент, снижает себестоимость бетона;
- Повышает раннюю и финальную прочность, водонепроницаемость и долговечность бетона;
- Повышает оборачиваемость опалубки;

- Увеличивает стойкость бетона против климатического и химического воздействия;
- Уменьшает количество воды затворения;
- Экономит энергию при обработке бетонной смеси;
- Даёт бетонной поверхности качественный вид, не меняет цвет бетона и не создаёт выцветы;
- Препятствует вовлечению лишнего воздуха в бетон;
- Подходит для армированных и предварительно напряженных конструкций, т.к. не содержит хлоридов;
- Экономит время и тепловую энергию при термической обработке бетона.

Также в экспериментах был использован такой продукт, как Sika Viskocrete 25 RU – эффективная суперпластифицирующая и суперводоредуцирующая добавка, предназначенная для производства высококачественных бетонных смесей и получения бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Технические характеристики Sika Viskocrete 25 RU:

- основа: водные композиции модифицированных поликарбоксилатных эфиров,
- внешний вид: мутная жидкость светло-желтого цвета,
- плотность (при 20 град. С): 1,070 – 1,085 кг/дм³,
- показатель pH: 4,0 – 6,0,
- соответствует: ТУ 2493-009-13613997-2011,
- рекомендуемая дозировка: 0,3 – 1,6 % жидкой добавки от массы цемента.

Оптимальная дозировка устанавливается на основе лабораторных испытаний и зависит от зернового и гранулометрического состава заполнителей, от наличия в составе тонкодисперсных компонентов, марки цемента, расхода цемента на производство бетонной смеси, продолжительности перемешивания и температуры смеси.

Sika Viskocrete 25 RU используется растворённым в воде или добавляется одновременно с добавлением воды в замес непосредственно в миксер. Введение пластификатора в сухую бетонную смесь до того, как будет произведено добавление воды, является недопустимым. С целью получения бетонной смеси однородной структуры, её перемешивание осуществляется не менее 60 секунд.

3 Исследование свойств бетона с использованием стеклобоя в качестве заполнителя

3.1 Исследование влияния стекольного боя на прочностные характеристики цементного камня

I серия образцов бетона.

С целью изучения возможности использования стеклобоя в качестве заполнителей для изготовления бетонных образцов I серии были использованы гранитный щебень фракции 5-10 мм, в качестве мелкого заполнителя – природный песок Волжского месторождения и стеклобой крупностью 0 – 10 мм. Стеклобой вводился в состав пластичной бетонной смеси в количестве 0, 30, 50, 70 и 100 % от массы мелкого заполнителя, заменяя песок данным количеством стеклобоя. Состав бетонной смеси представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Состав бетонной смеси.

№ замеса	0 - 1	0 - 2	0- 3	0 - 4	0 - 5
Содержание стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	0	30	50	70	100
Единица измерения	кг/м ³				
Цемент ЦЕМ II / А-К (Ш-П) 32,5Б	710	710	701	697	692
Песок природный Волжский	968	677	478	285	0
Бой стекла	0	290	478	665	943
Щебень 5 – 10 мм	266	266	263	261	260
Вода	330	330	325	323	320
Водоцементное отношение	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Средняя плотность, кг/м ³	2274	2274	2245	2235	2215

Изготовленные бетонные образцы размером 7,07 х 7,07 х 7,07 см из бетонной смеси различных составов выдерживались в течение 7 и 28 суток в нормальных условиях твердения. Предел прочности при сжатии образцов бетона приведен в пересчете на предел прочности образцов стандартного

размера 150x150x150 мм. Результаты исследований представлены на рис. 3.1 и в табл. 3.2.

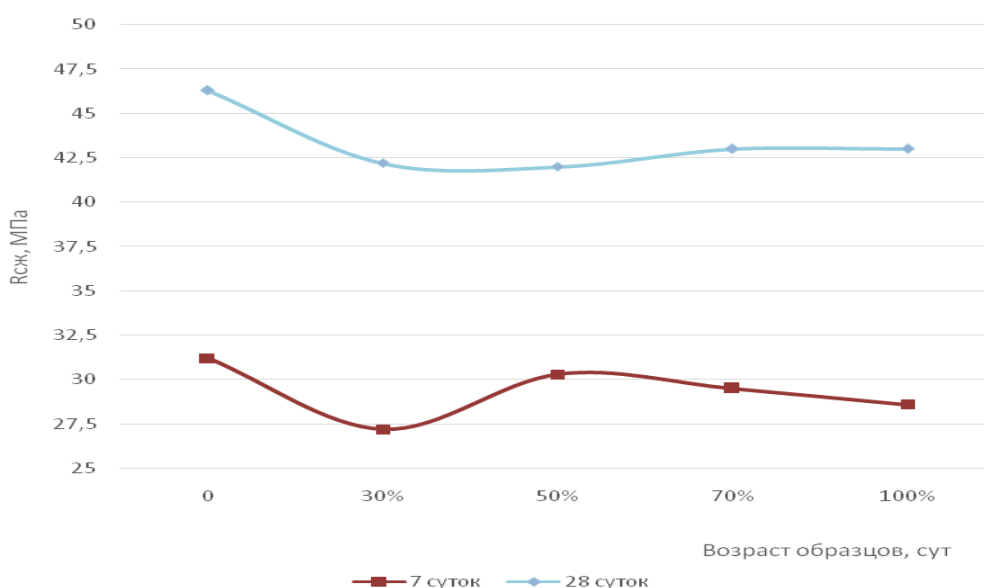


Рисунок 3.1 – Зависимость прочности бетона от количества стеклобоя

Таблица 3.2 – Предел прочности при сжатии (МПа) при количестве стеклобоя в % от массы мелкого заполнителя

Возраст образцов	Количество стеклобоя от массы мелкого заполнителя				
	0%	30%	50%	70%	100%
7 суток	31,2	27,2	30,3	29,5	28,6
28 суток	46,3	42,2	42,0	43,0	43,0

Проведенные исследования показали, что при замене мелкого песка стеклобоя в количестве 30% происходит снижение прочности бетона в возрасте 28 суток $\approx$ на 9%, а при дальнейшем увеличении доли стеклобоя в мелком заполнителе – происходит незначительное увеличение прочности бетона. При замене мелкого песка стеклобоя в количестве 70% происходит снижение прочности бетона в возрасте 28 суток $\approx$ на 7%. Можно предположить, что снижение прочности бетонов при добавлении в мелкий заполнитель стеклобоя происходит в результате того, что зёрна стекла имеют гладкую поверхность, сцепление с цементным камнем отсутствует.

II серия образцов бетона.

С целью повышения прочности бетонных образцов в качестве заполнителей для образцов II серии были использованы гранитный щебень

фракции 5-10 мм, в качестве мелкого заполнителя – дроблёный песок из гранита и стеклобой крупностью 0 – 10 мм. Стеклобой вводился в состав пластичной бетонной смеси в количестве 0, 30, 50, 70 и 100 % от массы мелкого заполнителя, заменяя песок данным количеством стеклобоя. В качестве вяжущего использовался нормальнотвердеющий портландцемент ЦЕМ I 42,5Н. Подвижность бетонной смеси II серии принималась такой же, как и в серии I. Состав бетонной смеси представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Состав бетонной смеси.

№ партии	1	2	3	4	5	6
Содержание стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	0	15	30	50	70	100
Единица измерения	кг/м ³					
Цемент ЦЕМ I 42,5Н	585	581	589	586	580	577
Песок дробленый из гранита	836	706	589	418	249	0
Бой стекла	0	125	252	418	580	824
Щебень 5 – 10 мм	627	623	631	627	622	618
Вода	293	291	295	293	290	289
Водоцементное отношение	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Средняя плотность, кг/м ³	2340	2325	2357	2342	2322	2308

Расчет состава бетонной смеси на 1м³ представлен в Приложении А.

Внешний вид бетонных образцов до испытания и после испытания на предел прочности при сжатии представлен на рис. 3.2.

Результаты испытаний бетонных образцов размером 7,07 x 7,07 x 7,07 см в возрасте 7, 14 и 28 суток после выдерживания в нормальных условиях твердения представлены на рис. 3.3 и табл. 3.4.



Рисунок 3.2 – Внешний вид бетонных образцов до испытания и после испытания на прочность при сжатии

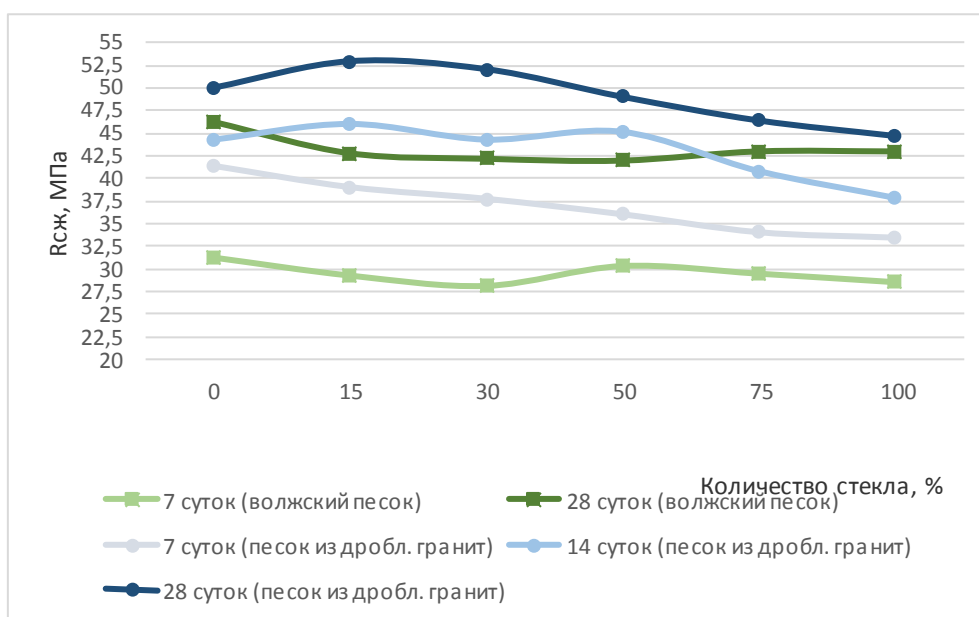


Рисунок 3.3 – Зависимость прочности бетона от количества стеклобоя

Табл. 3.4 – Результаты испытаний бетона на прочность

% стекла от массы мелкого заполнителя	Предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте, сутки				
	Дроблёный песок из гранита			Волжский песок	
	7	14	28	7	28
0	43,4	44,2	46,4	31,2	46,2
15	39,0	46,0	52,9	26	42,8
30	37,7	44,2	52,0	27,2	42,2
50	39,5	45,1	49,0	30,3	42
75	31,7	40,8	40,8	29,5	43
100	33,4	35,6	41,2	28,6	43

Согласно результатам испытаний, прочность бетонных образцов на дробленом песке из гранита выше, чем прочность образцов с аналогичным процентным содержанием стеклобоя на природном Волжском песке.

Данные рис. 3.3 и табл. 3.4 показывают на небольшой (в пределах 10%) набор прочности бетона с 15% содержанием стеклобоя в дробленом песке из гранита. Затем увеличение количества стеклобоя в дробленом песке плавно приводит к снижению прочности бетона. Так, замена дробленого песка из

гранита полностью стеклобоек снижает прочность бетона примерно на 11,2% по сравнению с прочностью бетонов, изготовленных только на дробленом песке.

Для исследования влияния на свойства бетона стеклобоек различной крупности была изготовлена III партия бетонных образцов. В данной партии бетонных образцов в качестве заполнителя был использован гранитный щебень фракции 5-10 мм, в качестве мелкого заполнителя – дроблёный песок из гранита и стеклобоек фракций: <0,16; 0,16-0,315; 0,315-0,63; 0,63-1,25; 1,25-2,5; 2,5-5; 5-10 мм. Стеклобой вводился в состав пластичной бетонной смеси в количестве 50% от массы мелкого заполнителя, заменяя дробленый песок данным количеством стеклобоек. Состав бетонной смеси представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Состав бетонной смеси.

№ партии	7	8	9	10	11	12	13
Размер фракции стеклобоек, мм	5-10	2,5-5	1,25- 2,5	0,63- 1,25	0,315- 0,63	0,16- 0,315	< 0,16
Единица измерения	кг/м ³						
Цемент	586	585	578	572	574	571	613
Песок дробленый	419	418	413	409	410	408	365
Бой стекла	419	418	413	409	410	408	365
Щебень 5 - 10мм	628	627	619	613	615	612	547
Вода	293	292	289	286	287	286	306
Водоцементное отношение	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Средняя плотность, кг/м ³	2345	2339	2311	2290	2296	2286	2196

При использовании в качестве мелкого заполнителя стеклобоек фракции 5-10 мм получается достаточно подвижная смесь с небольшим водоотделением. Это связано с увеличением доли заполнителя с большим размером фракции, в связи с чем происходит уменьшение водопоглощения. С уменьшением размера фракций стеклобоек наблюдается увеличение жёсткости бетонной смеси.

При изготовлении образцов бетона партии №12 с использованием стеклобоя с крупностью зерен от 0,16 до 0,315 мм бетонная смесь получилась жёсткая, что объясняется увеличением удельной поверхности зёрен мелкого заполнителя.

При использовании в качестве заполнителя стеклобоя крупностью менее 0,16мм (партия №13), смесь получилась очень жёсткой, не удобоукладываемой. Для улучшения удобоукладываемости, в состав бетонной смеси была добавлена вода и цемент в количестве 20% от первоначальной массы.

Расчет состава бетонной смеси на 1м³ представлен в Приложении Б.

В качестве вяжущего для изготовления бетонных образцов использовался цемент класса ЦЕМ I 42,5 Н. Результаты испытаний бетонных образцов, выдержанных в течение 7 и 28 суток в нормальных условиях твердения, на предел прочности при сжатии представлены на рис. 3.4 и в табл. 3.6.

Табл. 3.6 – Результаты испытаний бетонов на прочность

Возраст образца	Предел прочности при сжатии (МПа)						
	Размер фракции стеклобоя, мм						
	< 0,16	0,16-0,315	0,315-0,63	0,63-1,25	1,25-2,5	2,5-5	5-10
7 суток	29,5	36,9	40,8	36,4	39,9	29,5	39,0
28 суток	41,2	43,8	51,2	44,7	46,4	47,7	46,0

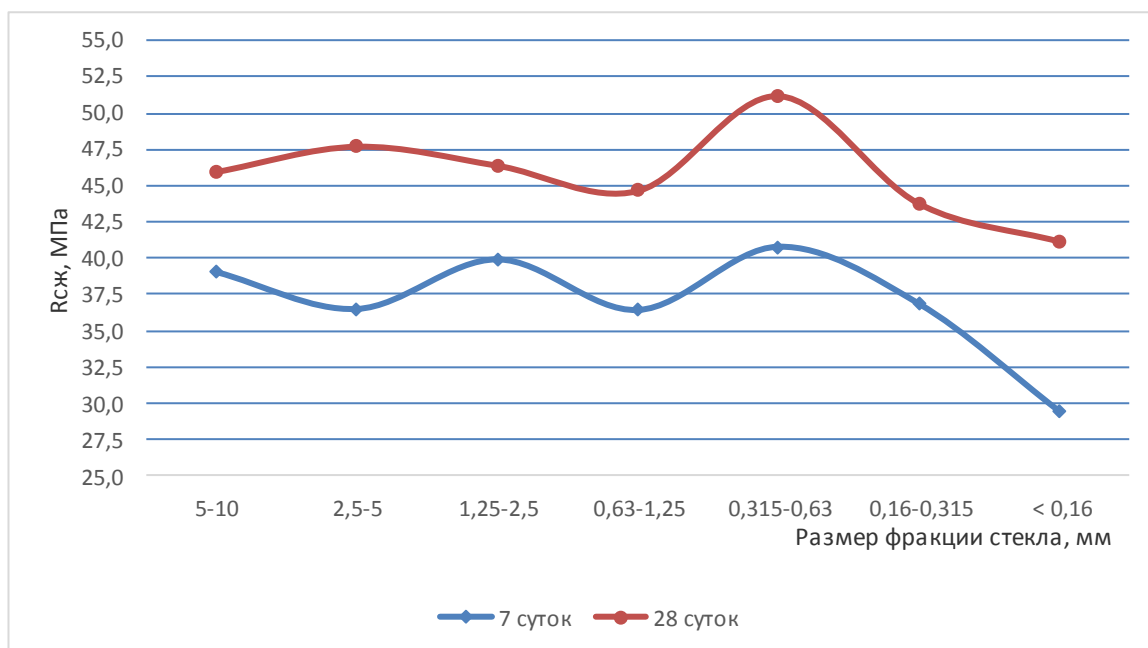


Рисунок 3.4 – Изменение прочности бетона в зависимости от размера крупности стеклобоя

Из результатов испытаний видно, что наибольший результат по пределу прочности при сжатии и в 7 и 28 суток твердения показали образцы бетона с использованием стеклобоя с крупностью зерен от 0,315 до 0,63 мм, наименьший результат — с крупностью зерен стеклобоя менее 0,16 мм. Следовательно, в качестве заполнителя в бетонах возможно использовать стеклобой крупных фракций, предпочтительно выше 1,25 см, причем прочность этих бетонов сравнима с прочностью обычных бетонов на природном и дробленом песке. Сравнивая результаты испытаний (табл. 3.4 и 3.6), можно сказать, что прочность обычных бетонов на природном и дробленом песке превосходит прочность бетона с использованием стеклобоя крупностью 0,315 – 0,63 мм. При размере частиц стеклобоя с крупностью зерен менее 0,315 мм происходит резкое снижение прочности бетона. Такое снижение прочности может быть объяснено высокой удельной поверхностью зерен заполнителя, что приводит к резкому снижению сцепления зерен стекла с цементным камнем.

3.2 Влияние активной минеральной добавки микрокремнезема и суперпластификаторов на прочностные характеристики цементного камня

В последние годы обязательным компонентом в любом высокопрочном бетоне являются минеральные добавки, например, микрокремнезем. Как и все пуццолановые материалы, микрокремнезем вступает в реакцию с гидроокисью кальция Ca(OH)_2 , образующейся при гидратации портландцемента в процессе гидратации вяжущих соединений. Высокая чистота и повышенная дисперсность микрокремнезема способствует более эффективной и быстрой реакции, что зависит от содержания реактивного кремнезема. Микрокремнезем может обеспечить прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов, в сочетании с эффективными суперпластификаторами. В результате совместного использования активных минеральных добавок и поликарбоксилатных суперпластификаторов возможно получение высокопрочных бетонов с повышенной долговечностью.

В данной работе проведено исследование влияния активной минеральной добавки микрокремнезема и эффективного суперпластификатора Sika Viskocrete 25 RU на прочностные характеристики цементного камня, изготовленного с применением стеклобоя.

При изготовлении IV партии бетонных образцов в качестве крупного заполнителя был использован гранитный щебень фракции 5-10 мм, в качестве мелкого заполнителя – дроблёный песок из гранита и стеклобой крупностью 0–10 мм. Стеклобой вводился в состав пластичной бетонной смеси в количестве 0, 30 и 50% от массы мелкого заполнителя, заменяя песок данным количеством боя стекла. Микрокремнезём вводился в состав смеси в количестве 10, 20 и 30% от массы цемента. В состав каждой из смесей данной партии так же вводился суперпластификатор Sika Viskocrete 25 RU в количестве 1% от массы цемента. Состав бетонной смеси представлен в таблице 3.7, изменение прочности бетона в зависимости от количества стеклобоя и микрокремнезема – на рисунках 3.5, 3.6 и 3.7.

Таблица 3.7 – Состав бетонной смеси.

№ партии	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Содержание стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	0	30	50	0	30	50	0	30	50
Содержание микрокремнезёма от массы цемента, %	10	10	10	20	20	20	30	30	30
Суперпластификатор Sika, % от Ц	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Единица измерения	кг/м ³								
Цемент	516	517	511	458	455	444	391	389	384
Песок дробленый	818	574	406	818	568	396	799	556	392
Микрокремнезём	57	57	57	115	114	111	168	167	165
Бой стекла	0	246	406	0	244	396	0	238	392
Щебень 5-10 мм	614	615	608	614	609	595	599	596	588
Вода	286	287	284	286	284	277	280	278	274
Суперпластификатор Sika	6	6	6	6	6	6	6	6	5
Водоцементное отношение	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Средняя плотность, кг/м ³	2297	2302	2277	2296	2279	2225	2242	2229	2201

Расчет состава бетонных смесей на 1 м³ представлен в Приложении В.

Зависимость прочности бетонных образцов с количеством микрокремнезёма 10, 20 и 30% от количества стеклобоя представлен на рисунках 3.5, 3.6, 3.7 соответственно.

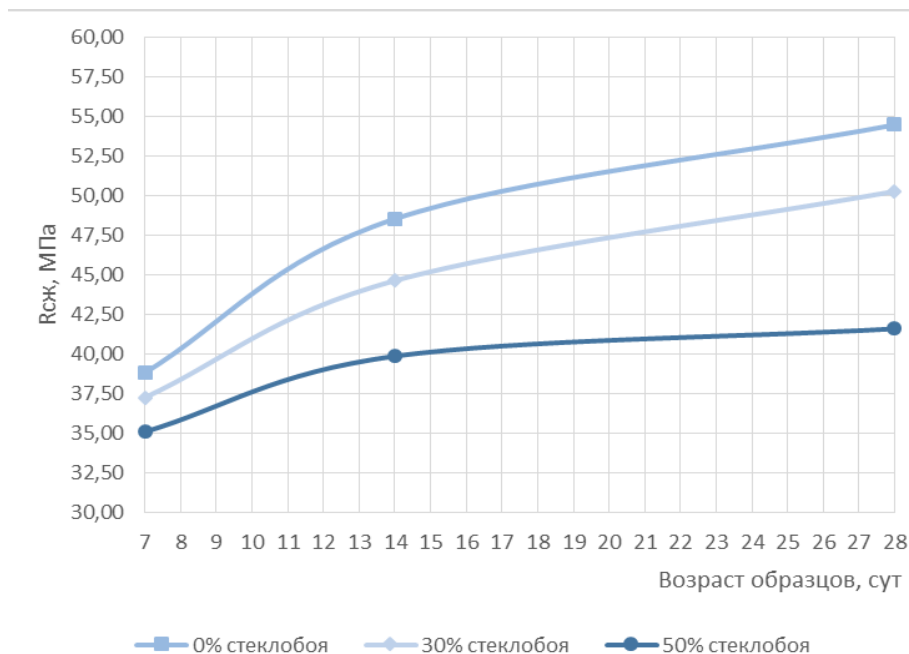


Рисунок 3.5 – Зависимость прочности образцов с микрокремнезёмом в количестве 10% от количества стеклобоя

Таблица 3.8 – Прочность образцов с микрокремнезёмом в количестве 10%

Количество стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	Предел прочности при сжатии (МПа)		
	Возраст образцов, сут		
	7	14	28
0	38,86	48,57	54,51
30	37,30	44,67	50,31
50	35,13	39,90	41,63

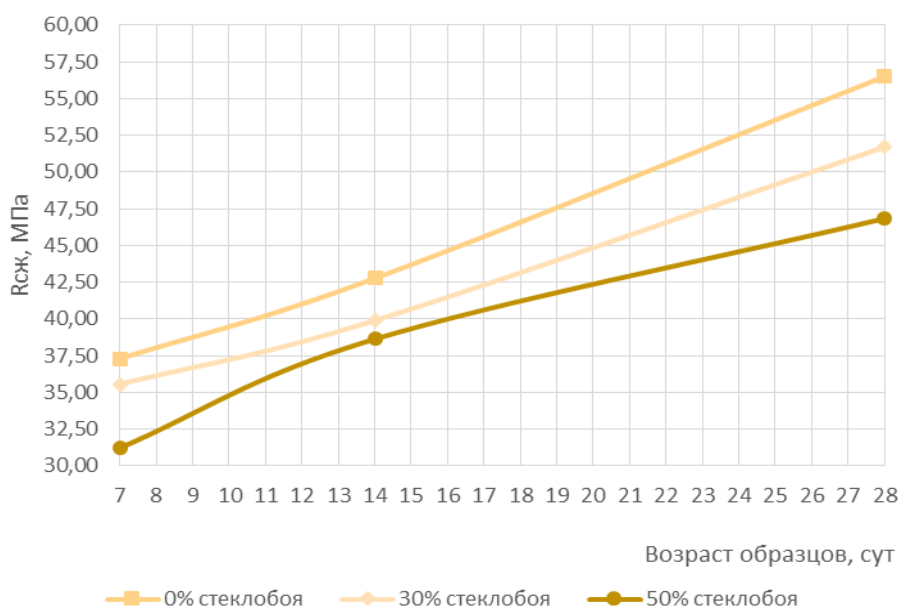


Рисунок 3.6 – Зависимость прочности образцов с микрокремнезёмом в количестве 20% от количества стеклобоя

Таблица 3.9 – Прочность образцов с микрокремнезёмом в количестве 20%

Количество стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	Предел прочности при сжатии (МПа)		
	Возраст образцов, сут		
	7	14	28
0	37,30	42,77	56,51
30	35,56	39,90	51,70
50	31,22	38,63	46,84

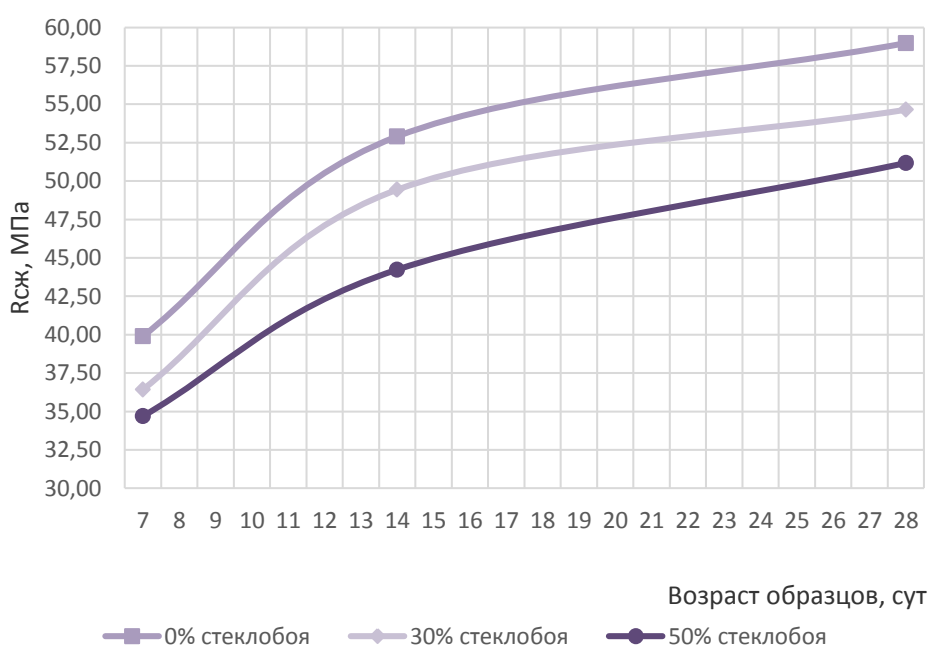


Рисунок 3.7 – Зависимость прочности образцов с микрокремнезёмом в количестве 30% от количества стеклобоя

Таблица 3.10 – Прочность образцов с микрокремнезёмом в количестве 30%

Количество стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	Предел прочности при сжатии (МПа)		
	Возраст образцов, сут		
	7	14	28
0	39,90	52,91	58,98
30	36,43	49,44	54,64
50	34,69	44,23	51,17

Применение суперпластификатора в составе бетонной смеси позволяет улучшить удобоукладываемость бетона, получить смесь с большей подвижностью (партия №14). Анализ свойств бетонных смесей показывает, что с увеличением количества стеклобоя наблюдается повышение жёсткости бетонной смеси. При использовании в составе бетонной смеси суперпластификатора, стеклобоя в количестве 50% от массы мелкого

заполнителя и микрокремнезёма в количестве 30% от массы цемента, смесь получается достаточно жёсткой и требуется на её уплотнение больше времени.

При приготовлении бетонных смесей установлено, что при увеличении количества микрокремнезема снижается подвижность бетонных смесей. Это наблюдается при постоянном водоцементном отношении ($B/C = 0,5$) и постоянном отношении количества суперпластификатора Sika к цементу (1 % от количества цемента). Данное явление объясняется тем, что при увеличении количества микрокремнезема значительно повышается общая водопотребность.

На рис. 3.8 наблюдается зависимость прочности образцов бетона от количества высокодиспергированного микрокремнезема. Из этого графика видно, что наилучшие результаты прочности получены при содержании в мелком заполнителе 30% стеклобоя и при замене цемента микрокремнеземом в количестве 30%.

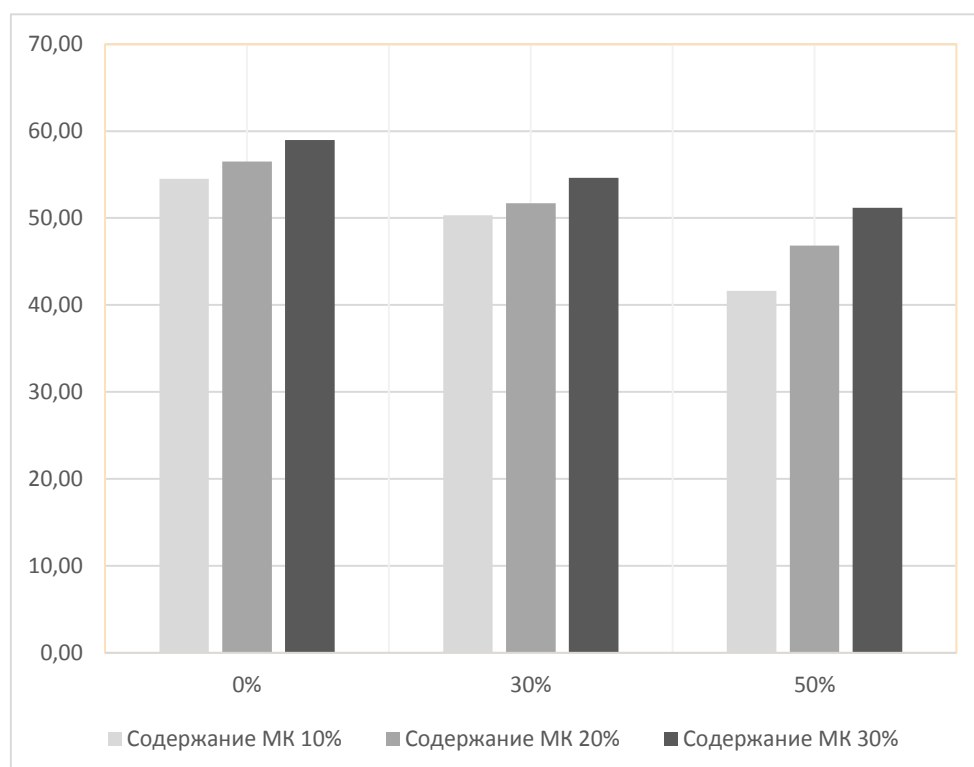


Рисунок 3.8 – Зависимость прочности образцов бетона от количества микрокремнезёма

Таблица 3.11 – Зависимость прочности образцов от количества стекла и микрокремнезёма

Количество стеклобоя	28 суток		
	Содержание МК 10%	Содержание МК 20%	Содержание МК 30%
0%	54,51	56,51	58,98
30%	50,31	51,70	54,64
50%	41,63	46,84	51,17

В образцах бетона с содержанием стеклобоя в количестве 30% замечен прирост прочности бетона на 2,7 – 8,6% при замене цемента от 10 до 30% соответственно. В образцах бетона с содержанием стеклобоя в количестве 50% прирост прочности бетона увеличивается уже на 11,1 – 22,9% при замене цемента микрокремнеземом от 10 до 30% соответственно.

Отсюда следует, что высокодиспергированный микрокремнезем действует как химический компонент при образовании цементного камня.

3.3 Применение стеклобоя в качестве заполнителя для изготовления высокопрочных бетонов

С целью изучения возможности использования стеклобоя в качестве заполнителя высокопрочных бетонов определенного состава были изготовлены бетонные образцы размером 10 x 10 x 10 см с использованием материалов, указанных в табл. 3.12. Образцы бетона партий 1 – 4 выдерживались в течение 3, 7 и 28 суток в нормальных условиях твердения. Результаты испытаний образцов бетона данных партий представлены на рис. 3.9 и в табл. 3.13.

Таблица 3.12 – Состав бетонной смеси.

№ партии	1	2	3(5)	4	6	7
Содержание стеклобоя от массы мелкого заполнителя, %	0	0	30	30	30	30
Единица измерения	кг/м ³					
Цемент ЦЕМ II / А-К (Ш-П) 32,5Б	301	232	238	238	362	473
Песок дроблёный из гранита	650	711	510	506	384	422
Бой стекла	0	0	218	216	163	181

Продолжение таблицы 3.12

Микрокремнезём	129	100	102	101	155	-
Щебень гранитный фракций 5 – 10 и 10 – 20 мм	1060	1159	1187	1179	1168	1280
Вода	258	271	204	203	208	189
Пластификатор STACHEMENT 2280	-	3	3	-	5	5
Пластификатор Sika Viskocrete 25 RU	-	-	-	2,81	-	
Водоцементное отношение	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
Средняя плотность, кг/м ³	2398	2476	2462	2446	2445	2550

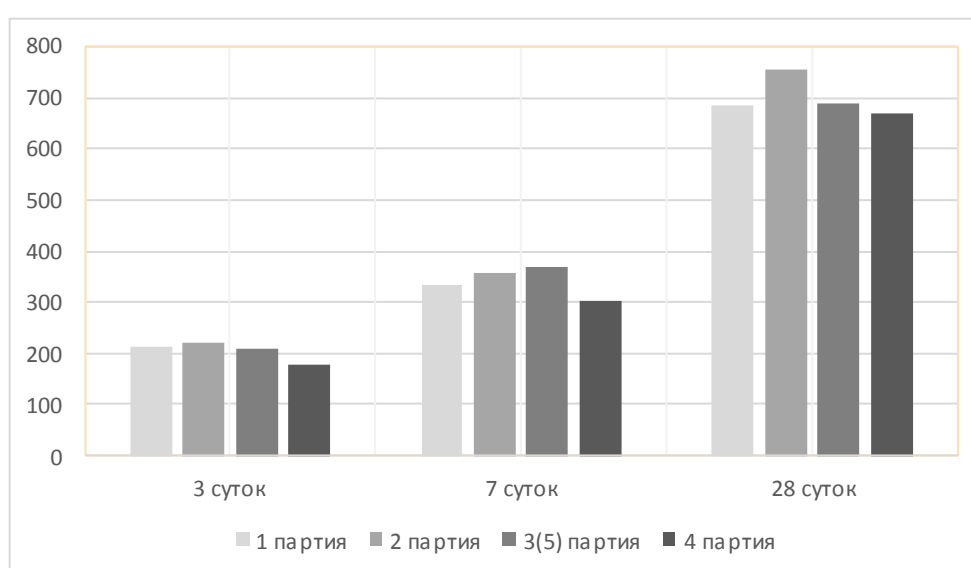


Рисунок 3.9 – Зависимость прочности образцов от состава бетонной смеси

Таблица 3.13 – Прочность образцов

Возраст образцов	1 партия	2 партия	3(5) партия	4 партия
3 суток	213	221	208	178
7 суток	335	358	370	302
28 суток	687	756	688	668

Данные рис. 3.9 и табл. 3.13 показывают, что при использовании в качестве гиперпластифицирующей добавки STACHEMENT 2280 повышаются прочностные характеристики бетона на 4 – 9% (партии 1 и 2). Стеклобой в качестве мелкого заполнителя снижает прочность бетонов на 6 – 9% (партии 2 и 3). При использовании в качестве пластифицирующей добавки Sika Viskocrete 25 RU получены бетоны, идентичные по прочности

бетонам на гиперпластификаторе STACHEMENT 2280. Однако набор прочности бетонов на гиперпластификаторе STACHEMENT 2280 происходит гораздо быстрее, чем на суперпластификаторе Sika Viskocrete 25 RU (партии 3 и 4).

В связи с тем, что стеклобой автором данной работы рекомендуется использовать в изготовлении бортовых камней, при определении пригодности стеклобоя в качестве мелкого заполнителя при приготовлении бетонной смеси были учтены требования ГОСТ 6665-91 «Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия»:

- водоцементное отношение (В/Ц) должно быть не более 0,40,
- бетонные смеси для тяжелого бетона с маркой по удобоукладываемости П2 или П3 с подвижностью не более 12 см следует приготавливать с обязательным применением пластифицирующих добавок,
- «для приготовления бетонной смеси следует применять бездобавочный портландцемент или портландцемент с минеральными добавками до 5%, соответствующие ГОСТ 10178»,
- модуль крупности песка должно быть не менее 2,0,
- наибольший размер зерен крупного заполнителя – 20 мм,
- марка щебня по прочности на сжатие должна быть не ниже М1000.

Составы изготовленных бетонных смесей исследуемого тяжелого бетона партий 6 и 7 представлены в табл. 3.12, результаты испытаний образцов бетона на прочность – на рис. 3.10.

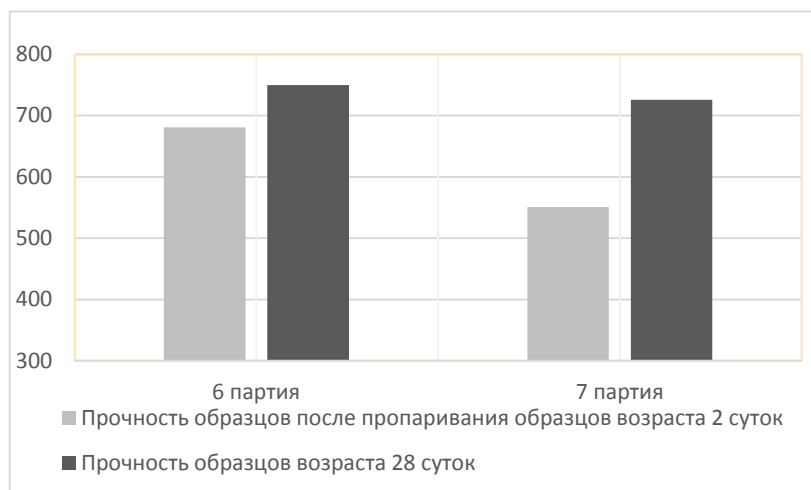


Рисунок 3.10 – Прочность образцов бетона

В качестве пластифицирующей добавки использовался гиперпластификатор STACHEMENT 2280.

При тепловлажностной обработке бетона соблюдался мягкий режим твердения (температура не выше 70 °С) с предельной скоростью подъема и снижения температуры обработки не более 25 °С/ч.

Анализируя результаты исследований, можно сделать вывод, что бетон, изготовленный с использованием в качестве наполнителя высокодиспергированного микрокремнезема имеет более высокие прочностные показатели, чем бетон без микрокремнезема (партии 6 и 7). После пропаривания бетон с микрокремнеземом набирает 90% марочной прочности, без микрокремнезема – только 75%. Класс полученного бетона партии 6 и 7 – В55.

Наличие высокодиспергированного микрокремнезема положительно сказывается на прочностные характеристики бетона, так как микрокремнезем в цементном камне вступает в реакцию с Ca(OH)_2 , выделяющемся при гидратации клинкерных минералов цемента C_3S и C_2S , с образованием очень прочных соединений. Высокая дисперсность микрокремнезема способствует эффективной и быстрой реакции. Множество сферических микрочастиц окружают каждое зерно цемента, уплотняют цементный камень, улучшают сцепление с заполнителем и заполняют пустоты прочными продуктами

гидратации [30]. «Микрокремнезем участвует в образовании продуктов гидратации, что приводит к увеличению качества мелких гелевых пор, входящих в состав кальцевосиликатного гидрогеля, а также снижает капиллярную пористость» [37]. Д. Дж. Паркер в своей работе [38] доказал, что «1 кг микрокремнезема может обеспечивать такую же прочность, как 3 – 5 кг обычного портландцемента, в смесях одинаковой удобоукладываемости при умеренном содержании микрокремнезема и цемента в обеих смесях». Также доказано, что бетоны, изготовленные с добавлением микрокремнезема в количестве до 30% в сочетании с суперпластификатором, достигают очень высокой ранней прочности.

Микрокремнезем обеспечивает прочность бетона на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов, и возможно изготовление высокопрочных бетонов с прочностью от 60 до 300 МПа.

В данных исследованиях прочность пропаренных образцов бетона с микрокремнеземом приблизительно на 19% больше, чем образцов бетона без микрокремнезема.

3.4 Исследование зоны контакта зерен стеклобоя с цементным камнем

Новые технологии производства бетонов основаны на глубоком изучении процессов, которые происходят на микроуровне в цементном камне. При этом контролируется наличие и скорость протекания химических процессов, которые происходят в твердеющем бетоне. В данной работе была изучена контактная зона зерен стекла с цементным камнем бетонов, отличающихся составом и условиями твердения.

Исследования, проведенные в Колумбийском университете (США) профессором С. Мейером, показали, что добавление стекла в цементный камень в большинстве случаев приводит к протеканию щелочно-силикатной реакции. В результате данной реакции между соединениями оксида кремния в аморфном виде, находящимися на поверхности стекла, и щелочами цемента образуется гель, который характеризуется значительной способностью к разбуханию, он поглощает воду с последующим увеличением своего объема.

Также стекло содержит на поверхности Na^+ , способный создавать определенную концентрацию NaOH в цементном камне даже в случае отсутствия щелочи в цементе, а с другой стороны стекло содержит на поверхности соединения оксида кремния в аморфном виде. В результате возникновения внутреннего давления, так как гель находится в цементном камне, образуются трещины, расширение и разрушение бетона.

Исследователи утверждают, что при использовании стекла высокой дисперсности расширения образцов бетона не наблюдается. На основании чего делается предположение, что процесс щелочно-силикатной реакции протекает в течение суток, вследствие чего зафиксировать расширение и разрушение образцов не представляется возможным.

В данной работе предлагается процесс подавления щелочно-силикатного взаимодействия в бетонах с заполнителем из стекла добавкой высодиспергированного микрокремнезема.

3.4.1 Исследование цементного камня бетона партии 3.

Состав бетонной смеси партии 3 представлен в таблице 3.3. Образцы бетона размером 7,07 x 7,07 x 7,07 см с момента изготовления в течение 28 суток набирали прочность в нормальных условиях твердения.

Микроструктура цементного камня при увеличении в 24 раза представлена на рис. 3.10. Отчетливо видны зерна стекла и дробленого песка из гранита. Структура цементного камня плотная.

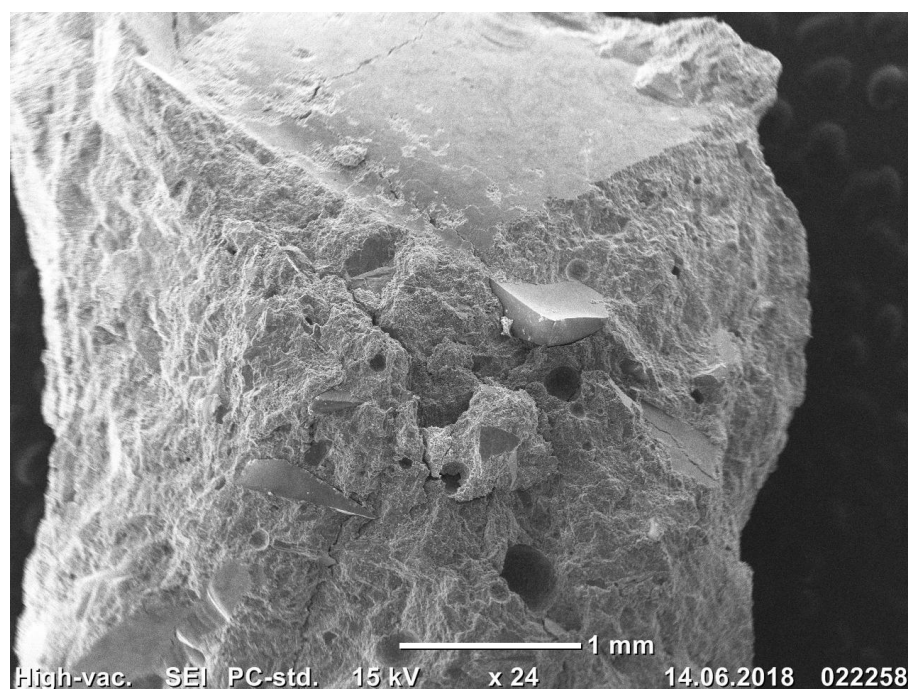


Рисунок 3.10 – Микроструктура цементного камня

На рисунках 3.11 и 3.12 при увеличении соответственно в 170 и 500 раз представлены зерна стекла разной крупности в качестве мелкого заполнителя в бетоне. Зерна стекла блестящие, сцепление с цементным камнем отсутствует.

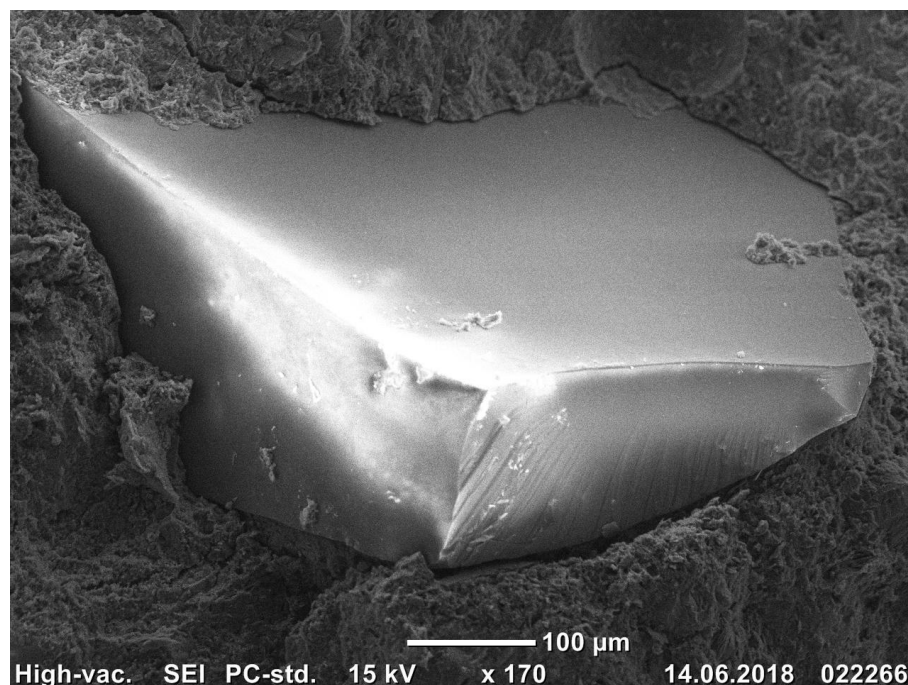


Рисунок 3.11 – Зерно стекла в цементном камне при увеличении в 170 раз



Рисунок 3.12 – Зерно стекла в цементном камне при увеличении в 500 раз

При увеличении в 2200 раз отчетливо виден зазор между зерном стекла и цементным камнем 3.13. Новообразований в результате реакции между аморфной разновидностью окиси кремнезема и NaOH не наблюдается.

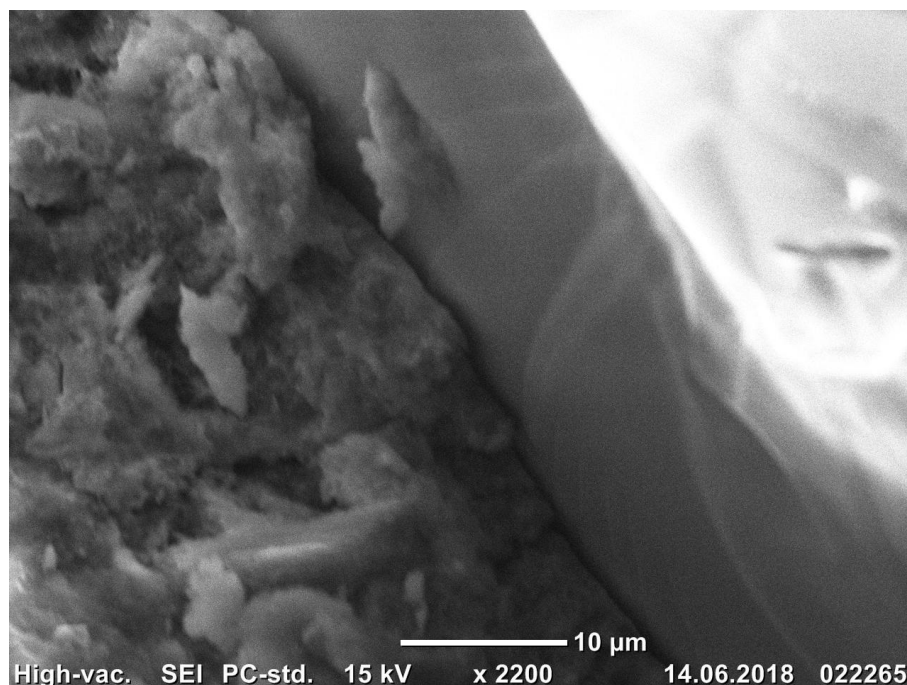


Рисунок 3.13 – Зерно стекла в цементном камне при увеличении в 2200 раз

Для сравнения на рис. 3.14 представлена контактная зона зерна гранита с цементным камнем. Зерно гранита имеет прочное сцепление с составляющими цементного камня: гидросиликатами, гидроалюминатами и гидроферритами кальция, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и др. Зазор между зерном заполнителя-гранита и продуктами гидратации цемента отсутствует.

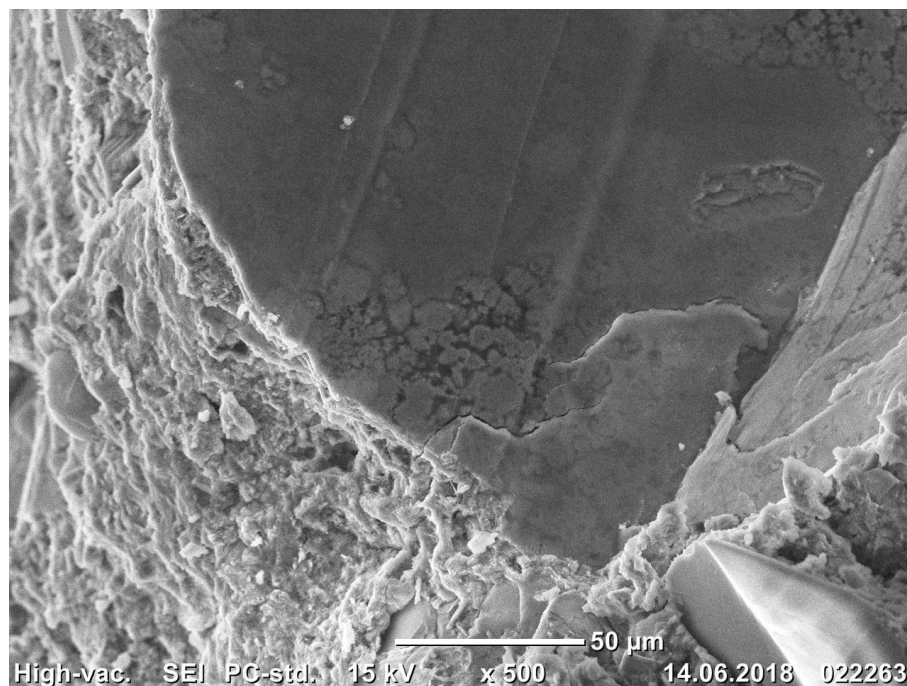


Рисунок 3.14 – Контактная зона зерна гранита с цементным камнем

3.4.2 Исследование цементного камня бетона партии 6 после пропаривания.

Состав бетонной смеси партии 6 представлен в таблице 3.12.

Образцы бетона размером 10 x 10 x 10 см на вторые сутки после изготовления были подвержены пропариванию по режиму 3 + 8 + 3 часа при температуре 70 град. С.

В составе данной партии бетона находится микрокремнезем в количестве 30% от массы цемента и гиперпластификатор STACHEMENT 2280 в количестве 1% от массы цемента.

Исследуя под микроскопом (увеличение 80 раз) структуру цементного камня, видим, что зерно стекла покрыто полимерной составляющей гиперпластификатора STACHEMENT 2280 (рис. 3.15 и 3.16). Граница между зерном стекла и составляющими цементного камня не четкая, размыта.

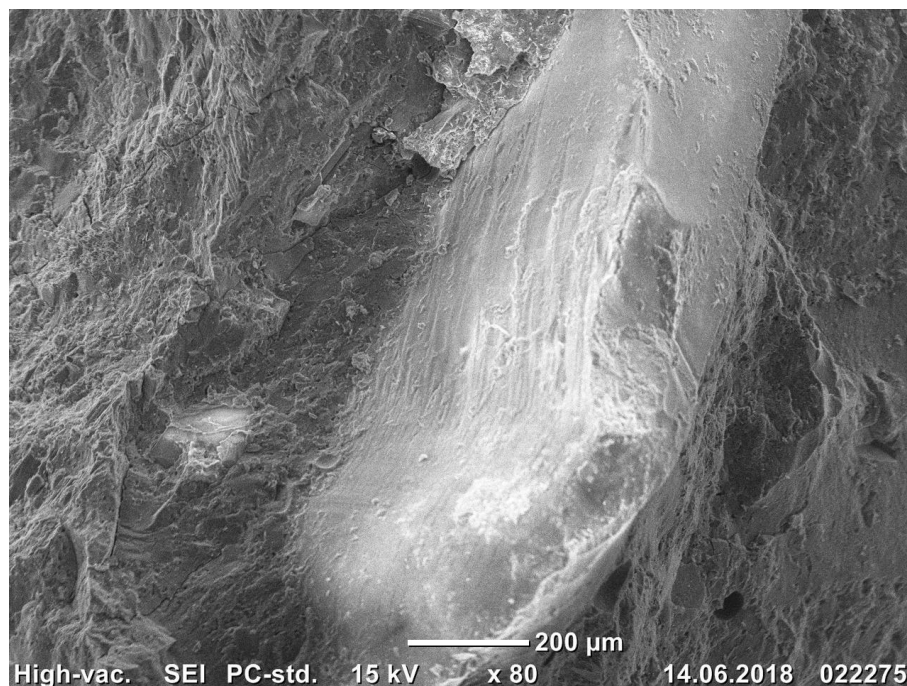


Рисунок 3.15 – Зерно стекла в цементном камне при увеличении в 80 раз

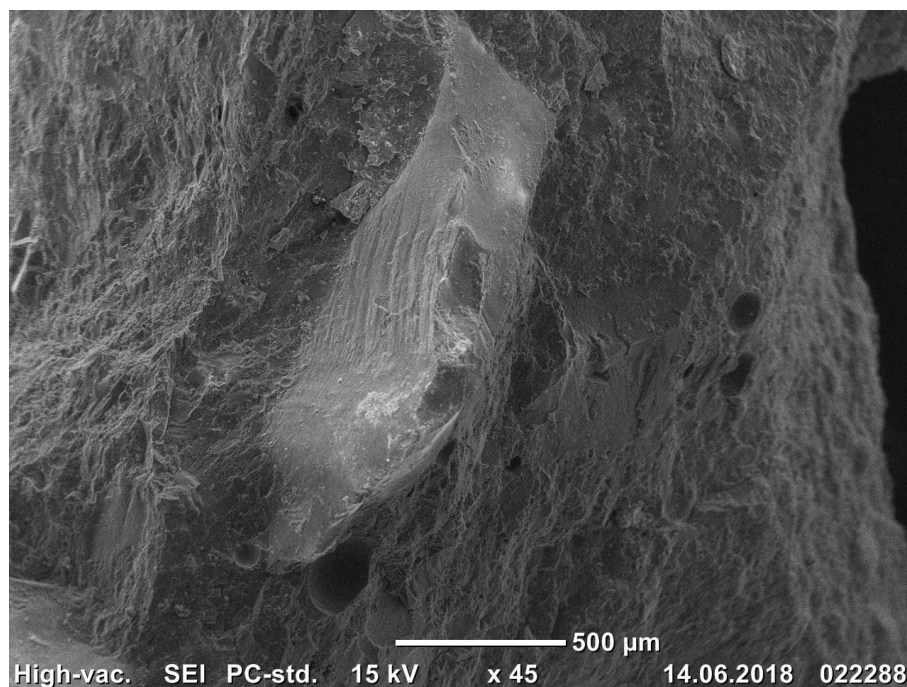


Рисунок 3.16 – Зерно стекла в цементном камне при увеличении в 45 раз

Полимерная составляющая гиперпластификатора STACHMENT 2280 с зерна стекла плавно переходит в цементный камень. Структура цементного камня несколько иная, чем в партии 3, большую роль играет наличие в

цементном камне полимерной составляющей гиперпластификатора на основе поликарбоксилата. Просмотрев несколько зерен стекла в цементном камне, приходим к выводу, что щель между зерном стекла, покрытым полимером, и цементным камнем практически отсутствует, что ее не удастся зафиксировать даже при увеличении 4000 раз.

3.4.3 Исследование цементного камня бетона партии 6 после выдерживания в нормальных условиях твердения.

На рисунке 3.17 при увеличении в 540 раз зерно стекла шероховатое, полости между зерном и цементным камнем не наблюдается. Граница стекла с цементным камнем находится в оболочке полимера, сцепление с цементным камнем прочное, что привело к высоким результатам прочности образцов бетона (рисунок 3.10).

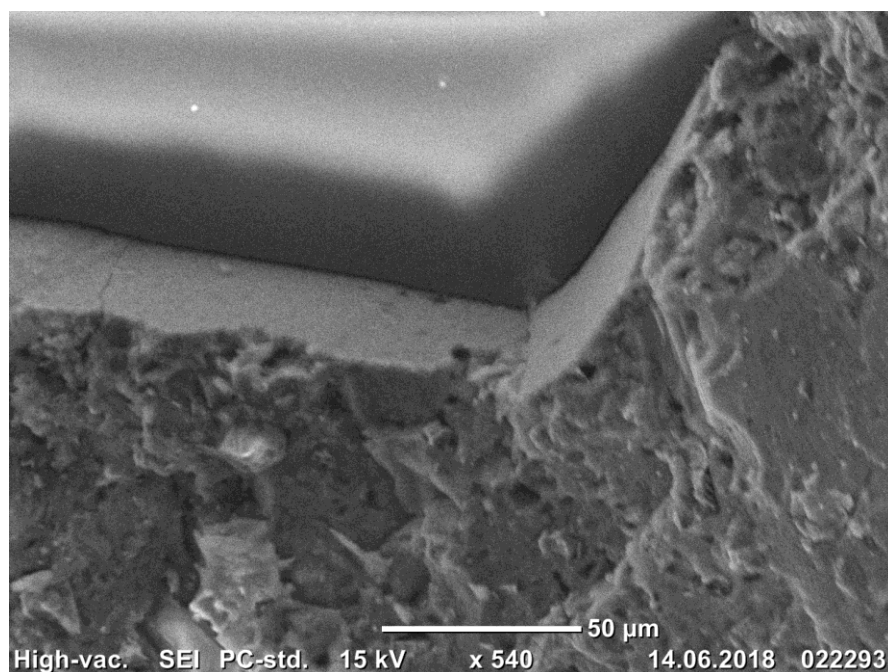


Рисунок 3.17 – Зерно стекла в цементном камне при увеличении в 540 раз

4 Расчёт несущей способности изгибаемых элементов по деформативной модели

В данном разделе приводятся различные виды диаграмм бетона и арматуры.

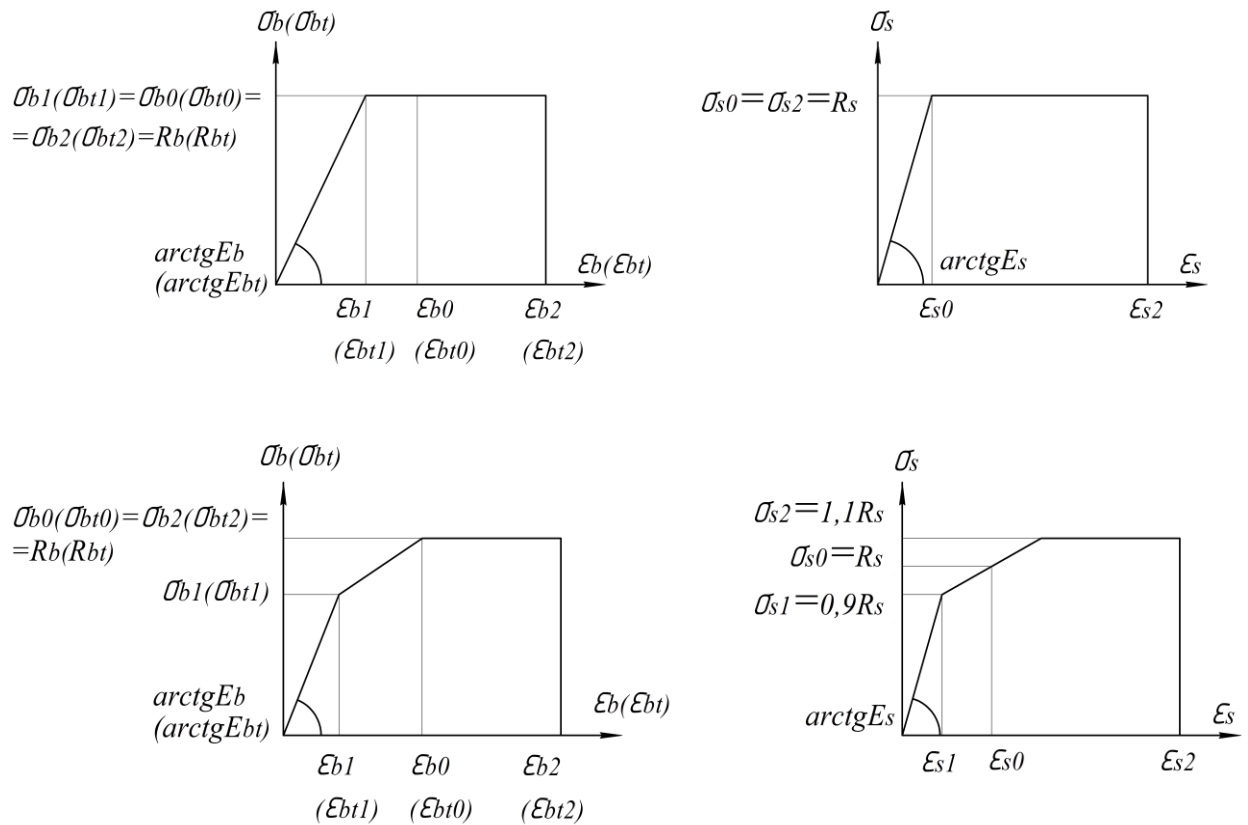


Рисунок 4.1 – Кусочно-линейные диаграммы бетона и арматуры

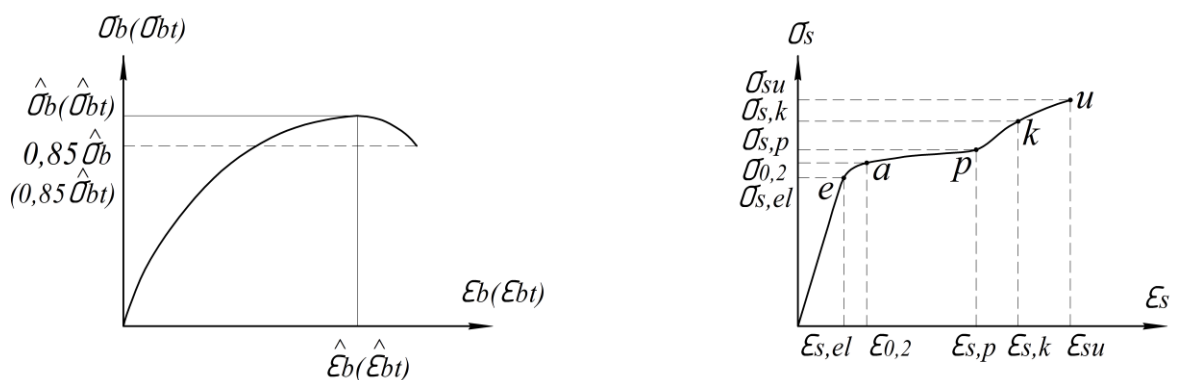


Рисунок 4.2 – Криволинейные диаграммы деформирования бетона и арматуры

4.2 Теоретические предпосылки расчета железобетонных изгибающих элементов на прочность

Для установления соотношения между значениями предельных моментов и деформаций в расчетах прочности нормального сечения железобетонного элемента по нелинейной деформационной модели используются нормируемые диаграммы состояния (деформирования) бетона при сжатии $\varepsilon_b - \sigma_b$: билинейная, трехлинейная (рис.4.3а), криволинейная с ниспадающей ветвью (рис.4.3б) - согласно рекомендациям [15] и аналогичные: упрощенная билинейная, параболически-линейная, криволинейная - согласно рекомендациям [16]. Законы изменения напряжений от деформаций в зависимости от очертания диаграмм представлены в указанных нормативных документах, а также в работах [28, 30, 36, 37]. В качестве расчетной диаграммы деформирования арматуры при растяжении $\varepsilon_s - \sigma_s$ (класса А-500 включительно) принимается единая рекомендуемая нормами [15, 16] билинейная диаграмма, в которой граница упругого участка ol ограничивается деформациями $\varepsilon_{so} = \sigma_{0,2}/E_s$ ($\sigma_{0,2}$ - предел текучести арматурной стали). В работах [31,32] предлагается алгоритм описания полной диаграммы (ветвь $oeapku$), где граница упругого участка oe ограничивается напряжениями равными пределу упругости арматуры $\sigma_s = \sigma_{s,el}$ (рис.4.3в). Далее рассматривается алгоритм расчета прочности с использованием нормируемых диаграмм в [15], а затем он апробируется в расчетах с диаграммами в [16].

В полных диаграммах арматуры (при $\sigma_s \geq \sigma_{s,el}$) и криволинейных диаграммах бетона связь между деформациями и напряжениями в нормах [15] соответственно принимается в виде

$$\sigma_s = \varepsilon_s \nu_s E_s; \quad \sigma_b = \varepsilon_b \nu_b E_b \quad (4.1)$$

где ν_s, ν_b - коэффициенты изменения секущего модуля арматуры и бетона [37].

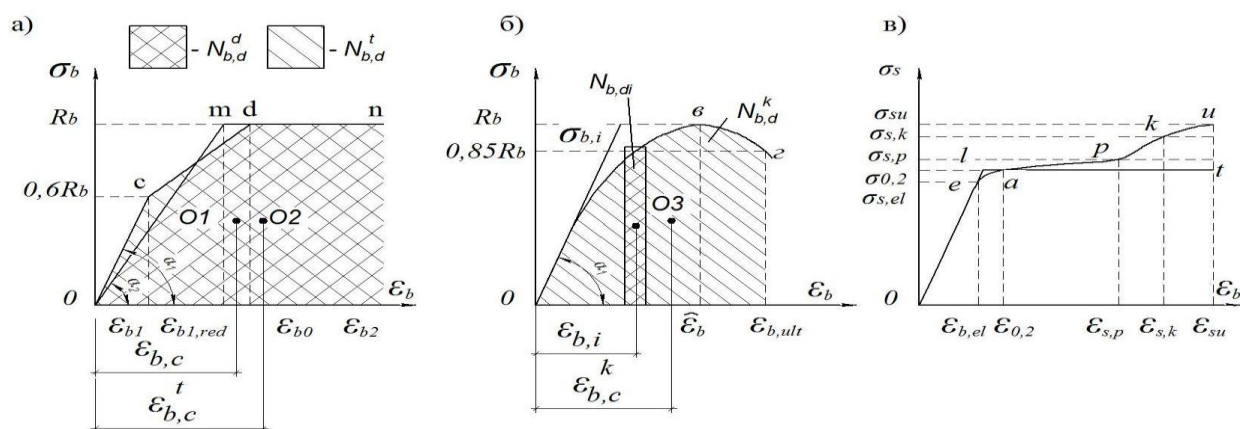


Рисунок 4.3 – Диаграммы деформирования бетона на сжатие:

а – кусочно – линейные (двухлинейная и трехлинейная),

б – криволинейная; в - арматуры на растяжение.

Для прямоугольного сечения с армированием в нижней зоне арматурой площадью A_s и в верхней зоне площадью A'_s (рис. 4.2 а) с учетом распределения относительных деформаций бетона и арматуры по линейному закону (рис. 4.2 б) эпюры напряжений представлены на рисунке 2 в,г,д. На основании линейного закона распределения относительных деформаций по высоте элемента следуют соотношения

$$\frac{1}{\rho} = \chi = \frac{\varepsilon_{sn}}{h_0 - x} = \frac{\varepsilon_{bn}}{x} = \frac{\varepsilon_{bn} + \varepsilon_{sn}}{h_0}, \quad (4.2)$$

где h_0 – рабочая высота сечения; x – высота сжатой зоны; ε_{bn} – относительные деформации на крайнем волокне бетона сжатой зоны; χ – кривизна элемента; ρ – радиус кривизны; ε_{sn} – относительные деформации в растянутой арматуре.

Прочность сечения проверяется из условий

$$|\varepsilon_{b,\max}| \leq \varepsilon_{b,ult}; \quad |\varepsilon_{s,\max}| \leq \varepsilon_{s,ult}, \quad (4.3)$$

где $\varepsilon_{b,\max}, \varepsilon_{s,\max}$ – максимальные относительные деформации от внешней нагрузки; $\varepsilon_{b,ult} = \varepsilon_{b2} = 3,5\text{‰}$ – предельные относительные деформации сжатого бетона (для криволинейной диаграммы $\varepsilon_{b,ult}$ вычисляется при уровне

напряжений $\eta=0,85$); $\varepsilon_{s,ult} = \varepsilon_{s2} = 25\text{‰}$ - предельные относительные деформации растянутой арматуры. При деформациях выше предельных соответствующий элемент бетона или стержень арматуры исключаются из работы.

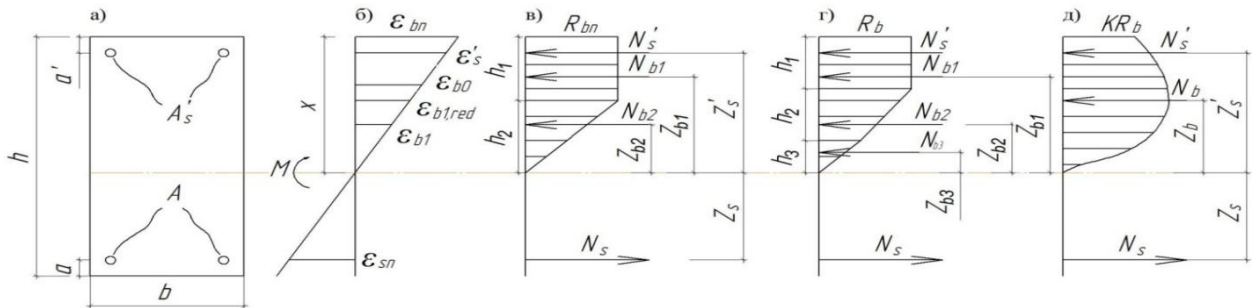


Рисунок 4.4 – Схемы усилий, напряжений и деформаций в поперечном сечении изгибаемого ненапряженного элемента при расчете на прочность с использованием кусочно – линейных (в -двухлинейных, г – трехлинейных) и д - криволинейной диаграмм бетона на сжатие.

В общем случае, когда ветви диаграммы описываются нелинейными уравнениями (рис.4.3б), с помощью компьютерного моделирования по оси деформаций откладываются отдельные малые участки $\Delta\varepsilon_{b,i}$ (i - номера участков). Относительным деформациям в диаграммах $\Delta\varepsilon_{b,i}$ в сжатой зоне элемента соответствует высота элементарного участка сечения $\Delta h_{b,i} = \Delta\varepsilon_{b,i} / \chi$, с величиной напряжения $\sigma_{b,i}$. Площадь i - го участка диаграммы определяется по формуле: $A_{b,i} = \Delta\varepsilon_{b,i} \sigma_{b,i}$. Уравнение равновесия усилий в сечении железобетонного элемента запишется в виде

$$N_b + N'_s - N_s = 0, \quad (4.4)$$

Деформации арматуры вычисляются из выражений:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{bn} - \chi a', \varepsilon_s = \chi h_0 - \varepsilon_{bn} \quad (4.5)$$

Значение усилия N_b , воспринимаемые бетоном сжатой зоны в предельном состоянии для полосы единичной ширины ($b=1$), вычисляется по формуле:

$$N_b = N_{b,d} / \chi \quad (4.6)$$

где в общем случае $N_{b,d} = \sum_{i=1}^n A_{b,i} = \sum_{i=1}^n \sigma_{b,i} \Delta \varepsilon_{b,i}$ - представляет собой работу, затраченную на деформацию образца при нагрузке до их предельных значений, численно равную сумме площадей элементарных участков в области, ограниченной ветвями диаграмм бетона на сжатие. С учетом полученных зависимостей уравнение равновесия (4.4) шириной b запишется

$$\frac{N_{b,d} b}{\chi} + \sigma_s' A_s' - \sigma_s A_s = 0 \quad (4.7)$$

Проверку уравнения равновесия (4.7) выполняется методом последовательных приближений (методом итераций). На первом приближении на крайнем волокне бетона сжатой зоны и растянутой арматуре принимаются предельные значения деформаций $\varepsilon_{bn}^{(1)} = \varepsilon_{b,ult}$; $\varepsilon_{sn}^{(1)} = \varepsilon_{s,ult}$. В соответствии с принятыми знаками перед слагаемыми в левой части уравнения (4.7) по результатам вычисления могут возникнуть два случая: 1 – левая часть уравнения (4.7) больше нуля, что свидетельствует о недостаточности армирования сечения; 2 – левая часть уравнений (4.7) меньше нуля, что означает - переармированное сечение. При возникновении первого случая необходимо при постоянных значениях $\varepsilon_{s,ult}$ уменьшать деформации первого приближения $\varepsilon_{bn}^{(1)}$ на величину $\Delta \varepsilon_b^{(k)}$ до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность приближения:

$$\Delta \varepsilon_b^{(k)} \leq 0.01 \varepsilon_{bn}^{(1)} \quad (4.8)$$

При реализации второго случая, т.е. когда левая часть уравнения оказалась меньше нуля, алгоритм проверки уравнения равновесия (4.7) выполняется в той же последовательности. Однако деформации в арматуре, принятые в первом приближении $\varepsilon_{sn}^{(1)} = \varepsilon_{s2} = 25 \text{‰}$, уменьшаются на втором цикле итераций на величину приращения $\varepsilon_s^{(2)} = \varepsilon_{sn}^{(1)} - \Delta \varepsilon_s^{(1)}$ при постоянных значениях деформаций на крайнем волокне сжатой зоны бетона $\varepsilon_{b,ult} = 3,5 \text{‰}$. Вычисления выполняются до тех пор, пока не будет достигнута достаточная (заданная) точность выполнения условия (4.8) по $\Delta \varepsilon_s^{(k)}$. Расстояния усилий в

арматуре N_s' , N_s и усилий в бетоне N_b до нейтральной оси соответственно составляют:

$$z_s' = \frac{\varepsilon_b^{(k)} - a' \chi^{(k)}}{\chi^{(k)}}; \quad z_s = \frac{\chi^{(k)} h_0 - \varepsilon_b^{(k)}}{\chi^{(k)}}; \quad z_b = \frac{S_{b,d}}{\chi^{(k)} N_{b,d}} = \frac{\varepsilon_{b,c}}{\chi^{(k)}}, \quad (4.9)$$

где $S_{b,d} = \sum_{i=1}^n A_{b,i} \varepsilon_{b,i} = \sum_{i=1}^n \sigma_{b,i} \Delta \varepsilon_{b,i} \varepsilon_{b,i}$ - момент, численно равный сумме произведений площадей элементарных площадок в диаграммах бетона на расстояния их центров тяжести до оси напряжений σ_b ; $\varepsilon_{b,c} = S_{b,d} / N_{b,d}$ - расстояние от оси напряжений σ_b ($\varepsilon_{b,c}^d, \varepsilon_{b,c}^t, \varepsilon_{b,c}^k$ - на рисунке 4.3 а,б) диаграмм бетона до их центров тяжести O_1, O_2, O_3 ; $\chi^{(k)}$ - кривизна элемента после выполнения условия (4.8) на k -ой итерации.

Уравнение для вычисления предельного изгибающего момента примет вид:

$$M_{ult} = N_b b z_b + \sigma_s A_s z_s + \sigma_s' A_s' z_s' \quad (4.10)$$

Для определения изгибающего момента M_{ult} используют величины $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_b^{(\kappa)}$ - для первого случая, $\varepsilon_{su} = \varepsilon_s^{(\kappa)}$ - для второго случая, $\chi^{(\kappa)}$, полученные на последних циклах итераций, после выполнения условия (4.8).

4.3 Характеристика опытных образцов и результаты испытаний

Образцы имеют прямоугольную форму сечения с высотой $h=18$ см, шириной $b=12$ см и длиной $l=210$ см. Армирование производилось симметрично сваренными каркасами (рис. 2.1) с продольной арматурой класса А-III (по два рабочих стержня в верхней и нижней зонах). Образцы разделены на 3 серии по диаметру продольной арматуры (8 мм, 10 мм, 12 мм).

Поперечная арматура – хомуты из проволоки 5 В-1, установленные с постоянным шагом 90 мм и соединительные стержни 5 В-1 с шагом 180 мм.

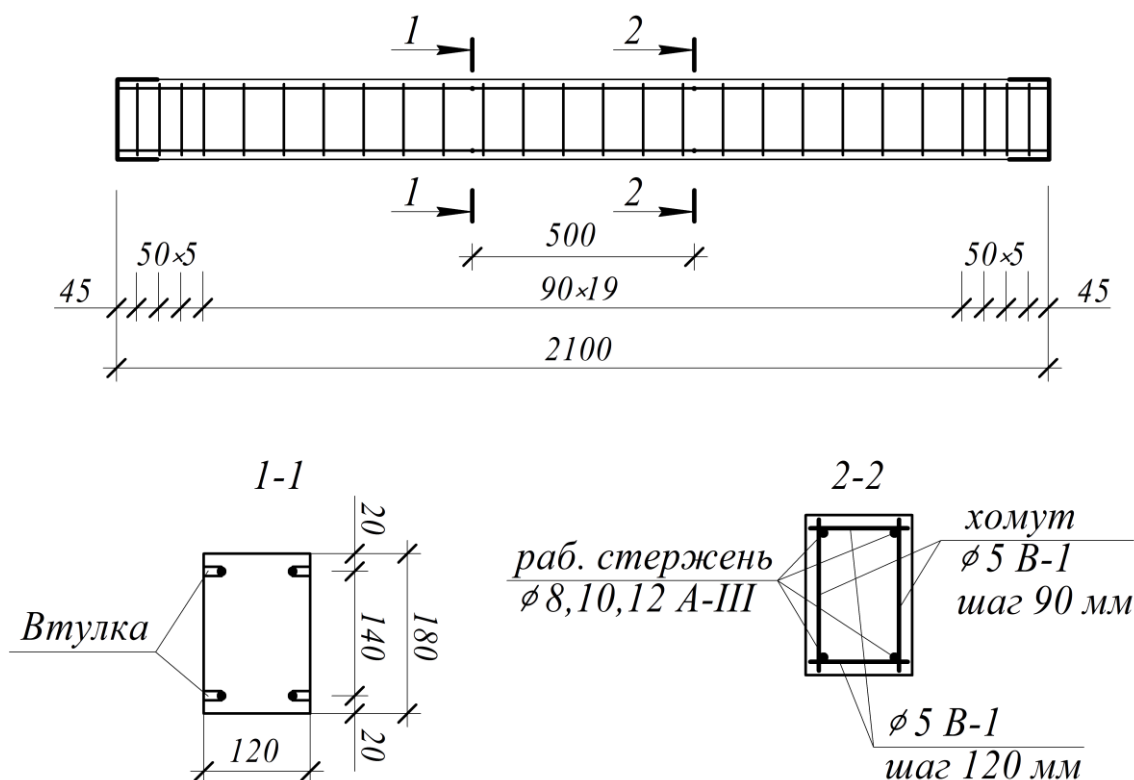


Рисунок 4.5 – Конструкция образцов

Загружение образцов производилось по схеме «чистого изгиба» (Рис.4.6).

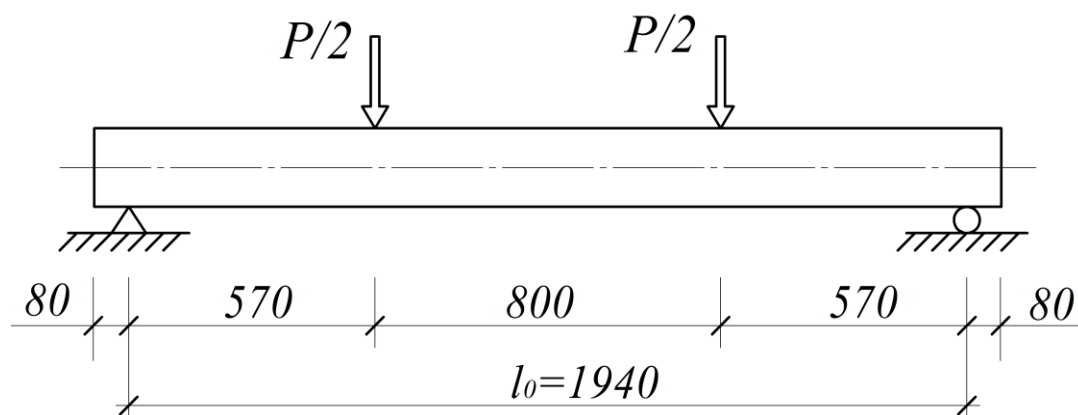


Рисунок 4.6 – Схема нагружения

4.4 Определение предельных моментов прогибов в середине пролёта

Для перехода к призмной прочности бетонных образцов найдём прочность кубиков с масштабным коэффициентом при испытании, равным 0,95 для кубов с ребром 100 мм, ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

$$R_n = 0,95 \cdot R_{сж} \quad (4.11)$$

$$R_n = 0,95 \cdot 75 = 71,3 \text{ МПа}$$

Призменная прочность бетонных образцов определяется по формуле 4.12:

$$R_{bn} = R_n \cdot (0,77 - 0,001 \cdot R_n) \quad (4.12)$$

$$R_{bn} = 71,3 \cdot (0,77 - 0,001 \cdot 71,3) = 49,82 \text{ МПа}$$

По схеме Г ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности» определим класс бетона с коэффициентом требуемой прочности $K_T=1,28$ при контроле для всех видов бетонов (кроме плотного силикатного и ячеистого):

$$B = \frac{R_{bn}}{K_T} \quad (4.13)$$

$$B = \frac{71,3}{1,28} = 55,7$$

Согласно табл. 6.11 СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» определены расчетные прочностные и деформационные характеристики бетона для класса В55,7: начальный модуль упругости $E_b=39,0 \cdot 10^3$ Мпа, сопротивление бетона сжатию $R_b=50$ Мпа. С использованием этих характеристик произведён расчет на прочность железобетонных изгибаемых элементов балочного типа с геометрическими размерами сечения $h=18$ см, $b=12$ см, пролётом $l=210$ см, с армированием арматурой класса А500. Расчет произведён по алгоритму, разработанному профессором Ерышевым В.А. и опубликована совместная статья в научном сборнике [21]. Расчет производился по разработанному программному комплексу в Microsoft Exel.

Программный комплекс включает три блока:

- Блок 1 – блок исходных данных, таблица 4.1;
- Блок 2 – блок итерации (последовательного приближения), таблица 4.2;
- Блок 3 – блок определения фактических параметров и значений предельных моментов, приложение Б.

Таблица 4.1 – Исходные данные

Геометрические размеры			Арматура			Бетон		
h	18	см	Арматура	АIII		Бетон	B30	30
b	12	см	As	2,26	см	Rb	498,2	кг/см ²
l	210	см	As'	2,26	см	Rbt	22	кг/см ²
			σ_t	4350	кг/см ²	ϵ_{bt1}	0,00008	кг/см ²
			Es	2000000	кг/см ²	ϵ_{bt0}	0,0001	
			ϵ_{s1}	0,00239		ϵ_{bt2}	0,00015	
			ϵ_{s2}	0,025		ϵ_b	0,00015	
			Rs	4350	σ_t	Eb	390000	кг/см ²
						h0	16	см
						азс	2	см
						азс'	2	см
						$\epsilon_{b1, red}$	0,0015	
						v0	1	1,286733
						w1	1,121256	1,085965
						w2	-0,12126	-0,08597
						$\epsilon^B = \epsilon_R$	0,00204	
						λ	1	
						v^B	0,627675	
						η_d	0,073703	
						k	0,85	

Таблица 4.2 – Итерация результатов

№ пром.	nd	ϵ	A	B	C	vB	Σ	Сигма в
1	0,1	0,00020	0,393807	0,48482	-0,1006	0,96691	0	76,74593
2	0,2	0,00041	0,393303	0,475064	-0,1006	0,934032	0	148,2726
3	0,3	0,00061	0,392463	0,465308	-0,1006	0,901163	0	214,5824
4	0,4	0,00081	0,391286	0,455552	-0,1006	0,868059	0	275,5996
5	0,5	0,00102	0,389773	0,445795	-0,1006	0,834406	0	331,1436
6	0,6	0,00122	0,387924	0,436039	-0,1006	0,799775	0	380,8801
7	0,7	0,00142	0,385739	0,426283	-0,1006	0,763536	0	424,2256
8	0,8	0,00163	0,383217	0,416526	-0,1006	0,724652	0	460,1387
9	0,9	0,00183	0,38036	0,40677	-0,1006	0,681117	0	486,5568
10	1,0	0,00204	0,377166	0,397014	-0,1006	0,627675	0	498,2
11	1,1	0,00224	0,348794	0,168897	0,01591	0,564967	0	493,2702
12	1,2	0,00244	0,340206	0,13929	0,01591	0,502493	0	478,6083
13	1,3	0,00265	0,330871	0,109682	0,01591	0,440623	0	454,6529

Расчёт производился для элементов с процентом армирования 0,52, 0,82 и 1,18. Результаты расчёта представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значение предельных моментов и прогибов в середине пролёта

μ , %	Криволинейная диаграмма		Двухлинейная диаграмма		Трёхлинейная диаграмма	
	M_{ult} , кН·м	f , мм	M_{ult} , кН·м	f , мм	M_{ult} , кН·м	f , мм
0,52	7,09	71,41	7,02	71,63	7,00	71,67
0,82	10,56	65,13	10,58	73,16	10,83	73,19
1,18	14,43	63,86	14,89	71,59	14,88	71,40

Данная методика апробирована на опытных образцах, где подтверждено соответствие расчётных и опытных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов проведенных экспериментальных исследований следуют следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что при замене мелкого природного заполнителя стеклобоем в результате отсутствия сцепления между зернами стекла и цементным камнем происходит снижение прочности бетона. При количестве в мелком природном песке Волжского месторождения 30% стеклобоя снижение прочности бетона в возрасте 28 суток происходит на 9%.

При использовании в качестве мелкого заполнителя дробленого песка из прочного гранита замена 15% песка стеклобоем не влияет на прочность бетонов. И только при содержании в песке стеклобоя в количестве более 30% приводит к плавному снижению прочности бетона. При полной замене дробленого песка стеклобоем выявлен явный максимум снижения прочности бетона (на 11,2% по сравнению с прочностью бетонов, изготовленных только на дробленом песке).

2. Выявлено, что в качестве заполнителя в бетонах возможно использовать стеклобой крупных фракций, предпочтительно выше 1,25 см, причем прочность этих бетонов сравнима с прочностью обычных бетонов на природном и дробленом песке. Так же прочность обычных бетонов на природном и дробленом песке превосходит прочность бетона с использованием стеклобоя крупностью 0,315 – 0,63 мм. При размере частиц стеклобоя с крупностью зерен менее 0,315 мм происходит резкое снижение прочности бетона. Такое снижение прочности может быть объяснено высокой удельной поверхностью зерен заполнителя, что приводит к резкому снижению сцепления зерен стекла с цементным камнем.

Для исключения возможности протекания щелочно-силикатного взаимодействия, увеличения стойкости цементного камня к трещинообразованию и снижения прочностных характеристик бетона при изготовлении бетонов с использованием в качестве заполнителя стеклобоя

рекомендуется использовать низкощелочные цементы с содержанием щелочей в пересчете на R_2O не более 0,6%.

3. Показана техническая целесообразность введения в состав бетонных смесей с использованием стеклобоя высокодиспергированного микрокремнезема, который обеспечивает высокую прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов, в сочетании с эффективными гиперпластификаторами на основе поликарбоксилата.

4. Экспериментально доказано, что одновременное сочетание двух составляющих (высокодиспергированного микрокремнезема и гиперпластификатора на основе поликарбоксилата STACHEMENT 2280) с использованием высокопрочных заполнителей с 30% содержанием в них стеклобоя возможно получение высокопрочных бетонов с прочностью при сжатии выше 60 МПа, при этом после пропаривания бетон с использованием микрокремнезема и гиперпластификатора на основе поликарбоксилата набирает 90% марочной прочности.

5. Впервые разработан состав высокопрочного бетона с использованием в качестве заполнителя стеклобоя в количестве 30% от массы мелкого заполнителя.

6. Разработанный высокопрочный бетон с использованием стеклобоя внедрен на заводе при изготовлении бортовых камней.

7. С полученными прочностными характеристиками бетона образцов №6 выполнен расчет железобетонных сечений 12х18(h) см при проценте армирования 0,52, 0,82 и 1,12. Расчет выполнен по алгоритму, разработанному профессором Ерышевым В.А. [21], произведён расчёт несущей способности изгибаемого элемента, изготовленного с применением полученного бетона, и опубликована в научном журнале совместная статья.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванко М.В. Мелкозернистый бетон из отходов стекла / М.В. Иванко, А.П. Горбач // Молодёжь. Наука. Общество.: Материалы четырнадцатой тольяттинской научной студенческой конференции.- Тольятти: издательство ТПП г. Тольятти. 2016 г.-156 с.
2. Иванко М.В. Мелкозернистый бетон из отходов стекла. «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 3–29 апреля 2017 года) : сборник студенческих работ /отв. за вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. –1 оптический диск.
3. Иванко М.В. Применение отходов стекла в производстве строительных материалов / М.В. Иванко, В.Н. Шишканова // ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: материалы международной научно-практической конференции (8 июня 2017 г.) Отв. ред. Зарайский А.А. - Москва: Издательство ЦПМ «Академия Бизнеса», 2017. – 214с.
4. Иванко М.В. Методика определения момента трещинообразования по нелинейной деформационной модели / В.А. Ерышев, М.В. Иванко // Развитие технических наук в современном мире. / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции № 4 г. Воронеж, 2017. 111 с.

ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 8.207-76 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

2. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

3. ГОСТ 31424-2010 Материалы строительные нерудные из отсеков дробления плотных горных пород при производстве щебня.

4. ГОСТ 7473-2010 Смеси бетонные. Технические условия.

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

6. ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования

7. ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний.

8. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия.

9. ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

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

11. ГОСТ 27006-86. «Бетоны. Правила подбора состава».

12. ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».

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

14. ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

15. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минрегион России. 2013. - 175с.

16. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. Строительные нормы республики Беларусь. Дата введения 2003-07-01.-139с.

17. Постановление мэрии городского округа Тольятти «Об утверждении Порядка сбора отходов на территории городского округа Тольятти (с изменениями на 27 ноября 2015 года).

18. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны // М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.

19. Брыков А.С. Гидратация портландцемента // Учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2008. 32 с.

20. Иванов И. А., Калашников В. И. Эффективность пластифицирования минеральных дисперсных композиций в зависимости от концентрации в них твердой фазы // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи. Тез. доклад III Всесоюзного симпозиума. Рига. РПИ. 1979. С. 35-38.

21. Ерышев В.А., Иванко М.В. Методика определения момента трещинообразования по нелинейной деформационной модели // Развитие технических наук в современном мире. / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции № 4 г. Воронеж, 2017. 111 с.

22. Калашников В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: Диссертация в форме научного доклада на соискание степени докт. техн. наук. Воронеж. 1996. 89 с.

23. Калашников В.И., Иванов И.А. О структурно-реологическом состоянии предельно разжиженных высококонцентрированных дисперсных

систем // Труды IV Национальной конференции по механике и технологии композиционных материалов. София: БАН, 1985. С. 127-130.

24. Калашников В. И., Иванов И. А. О характере пластифицирования минеральных дисперсных композиций в зависимости от концентрации в них твердой фазы // Механика и технология композиционных материалов. Материалы II Национальной конференции. София: БАН. 1979. С. 455-458.

25. Калашников В. И. О реакции различных минеральных композиций на нафталин-сульфоокислотные суперпластификаторы и влияние на нее быстросрастворимых щелочей // Механика и технология композиционных материалов. Материалы III Национальной конференции с участием зарубежных представителей. София: БАН. 1982.

26. Калашников В. И. Учет реологических изменений бетонных смесей с суперпластификаторами // Материалы IX Всесоюзной конференции по бетону и железобетону (Ташкент, 1983). Пенза. 1983. С. 7-10.

27. Калашников В. И., Иванов И. А. Особенности реологических изменений цементных композиций под действием ионностабилизирующих пластификаторов // Сборник трудов «Технологическая механика бетона». Рига: РПИ. 1984. С. 103-118.

28. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996.–416 с.

29. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Батраков В.Г. Комплексный модификатор бетона марки МБ–01 // Бетон и железобетон. № 5. 1997. С. 38–41.

30. Карпенко Н.И., Ерышев В.А. Методика построения диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия, журнал «Жилищное строительство», 2014, №7.

31. Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В. Методика расчета параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия, Вестник МГСУ, 2014, №3.

32. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Палювина С.Н. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами. - Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. 156 с.

33. Кетов А.А., Пузанов И.С., Саулин Д.В. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя // Строит. материалы. 2007. № 3. С. 70–72.

34. Кетов П.А., Корзанов В.С., Пузанов С.И. Использование вяжущих свойств дисперсных силикатных стекол при утилизации стеклобоя // Строит. материалы. 2007. № 5. С. 2–3.

35. Комохов П.Г. Классика и современность бетона // Сухие строительные смеси и новые технологии в строительстве. 2002. №1. С. 10-14.

36. Маилян Л.Р., Беккиев М.Ю. Работа бетона и арматуры при многократно повторных нагружениях. – Нальчик, 1984, 55 с.

37. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов / Г.В. Мурашкин, С.С. // Жилищное строительство. 2013. № 3. С. 38 – 40.

38. Паркер Д. Дж. Бетон с содержанием микрокремнезема // Concrete Society. Current Practice Sheet. 1985. №104. С. 4.

39. Панталеенко, В.Н., Л.А. Ерохина. Строительные материалы. Учебное пособие. Ухта: Изд-во Ухтинского государственного технического университета, 2012. 100 с.

40. Русина, В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учебное пособие. – Братск: ГОУ ВПО 2БрГУ2, 2007. - 224 с.

41. Федоркин С.И., Макарова Е.С., Елькина И.И. Влияние микрокремнезема на свойства и структуру прессованных материалов на основе мелкодисперсных отходов горных пород. Строительство и

техногенная безопасность // Сб. науч. трудов. Симферополь : НАПКС, 2012. Вып. 42. С. 47—51.

42. ENV 1992 –I-I: Eurocod 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General rules and Rules for Building. European Prestandart. Iune, 1992. – p.598-755.

43. Nikolay I. Karpenko, Valery A. Eryshev, Ekaterina V. Latysheva. Stress-strain Diagrams of Concrete Under Repeated Loads with Compressive Stresses// Procedia Engineering, Volume 111, 2015, Pages 371-377.

44. Kishitani Koichi, Yoon Jai Hwan. Safe Limit of Alkali Content in Alkali-Silica Reaction. Допускаемое содержание щелочей при возможном их взаимодействии с кремнеземом. //Rev. 39nd Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Techn. Sess., Tokyo, 1985, Synops. -Tokyo. -1985. -pp.240-243.

45. Meyer C., Egosi N., Andela C. Concrete with waste glass as aggregate // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 179–181.

46. Byars E.A., Zhu H., Meyer C. Use of glass for construction products: legislative and technical issues // Sustainable Waste Management: Proceedings of the International Symposium 9–11 September 2003, Dundee UK. P. 827–838.

47. Sugiyama M. The experiment on compression strength and freeze-thaw resistance of the concrete which mixed the tile clip // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 189–194.

48. Remarque W., Heinz D., Schleusser C. Glass powder as a reactive addition for blast furnace cements // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 229–238.

49. Dhir R.K., Dyer T.D., Tang M.C. Expansion due to alkali-silica reaction (ASR) of glass cullet used in concrete //Sustainable Waste Management: Proceedings of the International Symposium 9–11 September 2003, Dundee UK. P. 751–760.

50. Meland I., Dahl P.A. Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 167–177

51. Dyer T.D., Dhir R.K. Use of glass cullet as a cement component in concrete // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 157–166.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А.1 - Состав бетонной смеси на 1м³

Состав бетонной смеси на 1 м ³				Состав бетонной смеси на 1 м ³				Состав бетонной смеси на 1 м ³			
Состав №1	Масса	В частях	кг/м ³	Состав №2	Масса	В частях	кг/м ³	Состав №3	Масса	В частях	кг/м ³
Цемент	672	1,00	585	Цемент	672	1,00	581	Цемент	672	1,00	589
Песок	960	1,43	836	Песок	816	1,21	706	Песок	672	1,00	589
Бой стекла	0	0,00	0	Бой стекла	144	0,21	125	Бой стекла	288	0,43	252
Щебень	720	1,07	627	Щебень	720	1,07	623	Щебень	720	1,07	631
Вода	336	0,50	293	Вода	336	0,50	291	Вода	336	0,50	295
Мкуб7	803	4,00	2340	Мкуб7	797	4,00	2325	Мкуб7	808	4,00	2357
Мкуб10	2340			Мкуб10	2325			Мкуб10	2357		
Состав бетонной смеси на 1 м ³				Состав бетонной смеси на 1 м ³				Состав бетонной смеси на 1 м ³			
Состав №4	Масса	В частях	кг/м ³	Состав №5	Масса	В частях	кг/м ³	Состав №6	Масса	В частях	кг/м ³
Цемент	672	1,00	586	Цемент	672	1,00	580	Цемент	672	1,00	577
Песок	480	0,71	418	Песок	288	0,43	249	Песок	0	0,00	0
Бой стекла	480	0,71	418	Бой стекла	672	1,00	580	Бой стекла	960	1,43	824
Щебень	720	1,07	627	Щебень	720	1,07	622	Щебень	720	1,07	618
Вода	336	0,50	293	Вода	336	0,50	290	Вода	336	0,50	289
Мкуб7	803	4,00	2342	Мкуб7	796	4,00	2322	Мкуб7	792	4,00	2308
Мкуб10	2342			Мкуб10	2322			Мкуб10	2308		

Продолжение таблицы А.1

Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3							
Состав №7	Масса	В частях	кг/м3	Состав №8	Масса	В частях	кг/м3	Состав №9	Масса	В частях	кг/м3				
Цемент	672	1,00	586	Цемент	672	1,00	585	Цемент	672	1,00	578				
Песок	480	0,71	419	Песок	480	0,71	418	Песок	480	0,71	413				
Бой стекла	480	0,71	419	Бой стекла	480	0,71	418	Бой стекла	480	0,71	413				
Щебень	720	1,07	628	Щебень	720	1,07	627	Щебень	720	1,07	619				
Вода	336	0,50	293	Вода	336	0,50	292	Вода	336	0,50	289				
Мкуб7	804	4,00	2345	Мкуб7	802	4,00	2339	Мкуб7	793	4,00	2311				
Мкуб10	2345			Мкуб10	2339			Мкуб10	2311						
Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3			
Состав №10	Масса	В частях	кг/м3	Состав №11	Масса	В частях	кг/м3	Состав №12	Масса	В частях	кг/м3	Состав №13	Масса	В частях	кг/м3
Цемент	672	1,00	572	Цемент	672	1,00	574	Цемент	448	1,00	571	Цемент	806	1,00	613
Песок	480	0,71	409	Песок	480	0,71	410	Песок	320	0,71	408	Песок	480	0,60	365
Бой стекла	480	0,71	409	Бой стекла	480	0,71	410	Бой стекла	320	0,71	408	Бой стекла	480	0,60	365
Щебень	720	1,07	613	Щебень	720	1,07	615	Щебень	480	1,07	612	Щебень	720	0,89	547
Вода	336	0,50	286	Вода	336	0,50	287	Вода	224	0,50	286	Вода	403	0,50	306
Мкуб7	785	4,00	2290	Мкуб7	788	4,00	2296	Мкуб7	784	4,00	2286	Мкуб7	753	3,58	2196
Мкуб10	2290			Мкуб10	2296			Мкуб10	2286			Мкуб10	2196		

Продолжение таблицы А.1

Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3			
14	Масса	В частях	кг/м3	15	Масса	В частях	кг/м3	16	Масса	В частях	кг/м3
Цемент	604,8	1,00	516	Цемент	604,8	1,00	517	Цемент	604,8	1,00	511
Песок	960	1,59	818	Песок	672	1,11	574	Песок	480	0,79	406
МК	67,2	0,11	57	МК	67,2	0,11	57	МК	67,2	0,11	57
Бой стекла	0	0,00	0	Бой стекла	288	0,48	246	Бой стекла	480	0,79	406
Щебень	720	1,19	614	Щебень	720	1,19	615	Щебень	720	1,19	608
Вода	336	0,56	286	Вода	336	0,56	287	Вода	336	0,56	284
Зика	6,72	0,01	6	Зика	6,72	0,01	6	Зика	6,72	0,01	6
Мкуб7	788	4,46	2297	Мкуб7	790	4,46	2302	Мкуб7	781	4,46	2277
Мкуб10	2297			Мкуб10	2302			Мкуб10	2277		
Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3			
17	Масса	В частях	кг/м3	18	Масса	В частях	кг/м3	19	Масса	В частях	кг/м3
Цемент	537,6	1,00	458	Цемент	537,6	1,00	455	Цемент	537,6	1,00	444
Песок	960	1,79	818	Песок	672	1,25	568	Песок	480	0,89	396
МК	134,4	0,25	115	МК	134,4	0,25	114	МК	134,4	0,25	111
Бой стекла	0	0,00	0	Бой стекла	288	0,54	244	Бой стекла	480	0,89	396
Щебень	720	1,34	614	Щебень	720	1,34	609	Щебень	720	1,34	595
Вода	336	0,63	286	Вода	336	0,63	284	Вода	336	0,63	277
Зика	6,72	0,01	6	Зика	6,72	0,01	6	Зика	6,72	0,01	6
Мкуб7	788	5,01	2296	Мкуб7	782	5,01	2279	Мкуб7	763	5,01	2225
Мкуб10	2296			Мкуб10	2279			Мкуб10	2225		

Продолжение таблицы А.1

Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3				Состав бетонной смеси на 1 м3			
20	Масса	В частях	кг/м3	21	Масса	В частях	кг/м3	22	Масса	В частях	кг/м3
Цемент	470	1,00	391	Цемент	470	1,00	389	Цемент	470	1,00	384
Песок	960	2,04	799	Песок	672	1,43	556	Песок	480	1,02	392
МК	202	0,43	168	МК	202	0,43	167	МК	202	0,43	165
Бой стекла	0	0,00	0	Бой стекла	288	0,61	238	Бой стекла	480	1,02	392
Щебень	720	1,53	599	Щебень	720	1,53	596	Щебень	720	1,53	588
Вода	336	0,71	280	Вода	336	0,71	278	Вода	336	0,71	274
Зика	6,72	0,01	6	Зика	6,72	0,01	6	Зика	6,72	0,01	5
Мкуб7	769	5,73	2242	Мкуб7	765	5,73	2229	Мкуб7	755	5,73	2201
Мкуб10	2242			Мкуб10	2229			Мкуб10	2201		

Приложение Б

	$\varepsilon_j = \varepsilon_i - \varepsilon_{l/2}$	nd'	A	B	C	vB	Σ	Сигма в	Nbd	S	ε_{bs}
1	0,000102	0,05	0,393933	0,489699	-0,1006	0,983417	0	39,02806	0,007943	0,000001	0,000102
2	0,000305	0,15	0,393597	0,479942	-0,1006	0,950457	0	113,1599	0,023030	0,000007	0,000305
3	0,000509	0,25	0,392925	0,470186	-0,1006	0,917611	0	182,0823	0,037057	0,000019	0,000509
4	0,000712	0,35	0,391916	0,46043	-0,1006	0,884658	0	245,7609	0,050017	0,000036	0,000712
5	0,000916	0,45	0,390572	0,450673	-0,1006	0,851324	0	304,0722	0,061884	0,000057	0,000916
6	0,001119	0,55	0,388891	0,440917	-0,1006	0,817246	0	356,7668	0,072609	0,000081	0,001119
7	0,001323	0,65	0,386873	0,431161	-0,1006	0,781908	0	403,4022	0,082100	0,000109	0,001323
8	0,001526	0,75	0,38452	0,421404	-0,1006	0,744516	0	443,2049	0,090201	0,000138	0,001526
9	0,00173	0,85	0,381831	0,411648	-0,1006	0,703663	0	474,737	0,096618	0,000167	0,00173
10	0,001933	0,95	0,378805	0,401892	-0,1006	0,656277	0	494,8573	0,100713	0,000195	0,001933
11	0,002137	1,05	0,352808	0,1837	0,01591	0,596304	0	496,9654	0,101142	0,000216	0,002137
12	0,00234	1,15	0,344594	0,154093	0,01591	0,533684	0	487,1375	0,099142	0,000232	0,00234
13	0,002544	1,25	0,335632	0,124486	0,01591	0,471446	0	467,7475	0,095195	0,000242	0,002544
14	0,002742	1,347414	0,326184	0,095644	0,01591	0,411696	0	440,298	0,089609	0,000246	0,002742
15	0,002951	1,45	0,315469	0,065271	0,01591	0,350705	0	403,6258	0,041073	0,000121	0,002951
16	0,003155	1,55	0,304267	0,035664	0,01591	0,294665	0	362,5177	0,03689	0,000116	0,003155
17	0,003358	1,65	0,292318	0,006057	0,01591	0,243884	0	319,4009	0,032502	0,000109	0,003358
18	0,003562	1,75	0,279622	-0,02355	0,01591	0,200109	0	277,9543	0,028284	0,000101	0,003562
								$\Sigma =$	1,007259	0,001744	0,001732